



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE AGROINDUSTRIA**

Evaluación del uso del ultrasonido en el proceso de tinturado de fibra de alpaca y su efecto
en las propiedades físico-mecánicas

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Agroindustrial

Autor:
Velásquez Fala, Royer Javier

Tutor:
MgSc. Sebastián Alberto Guerrero Luzuriaga.

Riobamba, Ecuador. 2025

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Royer Javier Velásquez Fala**, con cédula de ciudadanía **060440310-5**, autor del trabajo de investigación titulado: Evaluación del uso del ultrasonido en el proceso de tinturado de fibra de alpaca y su efecto en las propiedades físico-mecánicas, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 19 de diciembre del 2025.



Royer Javier Velásquez Fala

C.I: 060440310-5

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Sebastián Alberto Guerrero Luzuriaga catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento, certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: Evaluación del uso del ultrasonido en el proceso de tinturado de fibra de alpaca y su efecto en las propiedades fisico-mecánicas, bajo la autoría de Royer Javier Velásquez Fala; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 19 días del mes de diciembre de 2025.



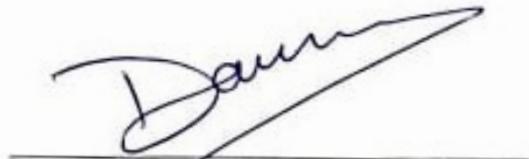
MgSc. Sebastián Alberto Guerrero Luzuriaga

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

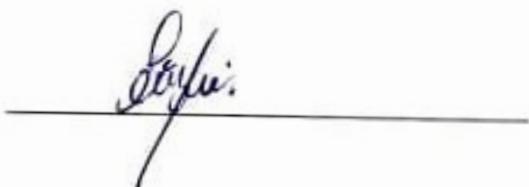
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “Evaluación del uso del ultrasonido en el proceso de tinturado de fibra de alpaca y su efecto en las propiedades físico-mecánicas”, presentado por Royer Javier Velásquez Fala con cédula de identidad número 0604403105, bajo la tutoría de Mgs. Sebastián Alberto Guerrero Luzuriaga; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente, se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba el 19 de diciembre del 2025.

Davinia Sánchez Macias, PhD.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



José Miranda Yuquilema, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



José Escobar Machado, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que, ROYER JAVIER VELÁSQUEZ FALA con CC: 060440310-5, estudiante de la Carrera de AGRINDUSTRIA, Facultad de Ingeniería; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "EVALUACIÓN DEL USO DEL ULTRASONIDO EN EL PROCESO DE TINTURADO DE FIBRA DE ALPACA Y SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS.", cumple con el 6%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio COMPILETO MAGISTER®, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 10 de diciembre de 2025



Msc. Sebastián Guerrero L.
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a Dios, ya que, él fue que me ha guiado y me ha dado la sabiduría para avanzar en mi carrera y cumplir con mis proyectos.

A mi querida madre que fue el pilar fundamental para seguir adelante con los estudios, además que es la persona más importante para mí que me guio, me cuido y me vio llegar a este punto de culminar mis estudios. A mi padre que fue la persona que me ayudo en la financiación de mis estudios universitarios. A mi padrastro que también fue quien me apoyo en la culminación de mis estudios y fue una de las personas que me ayudo psicológicamente para seguir adelante. A mi hermano y mi hermana que han sido las personas importantes para dedicarme a los estudios, ya que ellos están en proceso de ejercer sus profesiones. A mi hermano menor que su cariño es muy importante para mí para que siga adelante y para que yo sea un ejemplo para él.

A mis grandes amigos que han estado desde que empecé en la carrera y han sido mis grandes confidentes y han sabido ayudarme en todas mis dudas que se me han presentado en la carrera, también con los cuales he compartido momentos imborrables que quedaran por siempre en mi ser y por los cuales les considero parte importante de mi vida. A mis tíos, tías, primos, abuelitos y amigos que me han apoyado a la distancia para poder echarle ganas a la carrera y llegar a donde estoy ahora.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a dios por haberme iluminado con mucho conocimiento para poder acabar con mi carrera. Agradezco a mis padres que han sido mi apoyo durante estos años de estudio. Agradezco a mis amigos por estar siempre en mis momentos más felices de mi carrera y han formado gran parte de mis recuerdos como estudiante universitario.

Agradezco mucho a los docentes que han formado parte de esta carrera, ya que sin ellos las enseñanzas que tuve durante la misma habrían sido en vano y no podría tener el conocimiento que he generado durante los años que he cursado todos los ocho semestres de la carrera de Agroindustria. A mi docente tutor, el Mgs. Sebastian Guerrero que ha sido un gran mentor para guiarme en la elaboración de mi tesis y que sus enseñanzas me han ayudado mucho para que se desarrolle con éxito mi tesis. Agradezco mis compañeros de mi curso por haber sido parte del desarrollo de la carrera donde compartimos trabajos, proyectos y muchas otras experiencias que han sido de ayuda para que se generen aprendizajes que me serán útiles en mi etapa profesional.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO.....	
DEDICATORIA.....	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE DE TABLAS.	
ÍNDICE DE FIGURAS.....	
RESUMEN.....	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 Antecedentes	14
1.2 Problema	15
1.3 Justificación	16
1.4 Objetivos.....	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 MARCO REFERENCIAL.....	19
2.2 MARCO TEORICO	22
2.2.1 Alpaca	22
2.2.2 Fibra de Alpaca	23
2.2.3 Escarmenado	25
2.2.4 Desengrasado	25
2.2.5 Blanqueamiento.....	26
2.2.6 Teñido	26
2.2.7 Tecnologías Emergentes en la industria textil	27
2.2.8 Tecnología del Ultrasonido.....	28
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.....	30
3.1 Tipo de Investigación.	30

3.2	Diseño Experimental	30
3.2.1	Materiales y Equipos	31
3.2.2	Procedimientos	32
3.2.3	Diagramas de Flujo.....	33
3.3	Técnicas de Recolección de Datos	35
3.3.1	Análisis de Contenido de Grasa	35
3.3.2	Análisis Físico-Mecánico.....	36
3.3.3	Pruebas de Solubilidad Alcalina	37
3.3.4	Cálculo de los índices de blancura y amarillamiento en fibras.....	38
3.3.5	Microscopía por barrido Electrónico.....	39
3.4	Técnica de análisis.....	39
3.5	Población y Tamaño de Muestra	40
3.6	Hipótesis	40
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		41
4.1	Procesos preliminares previos al teñido de la fibra.....	41
4.1.1	Resultados de índice de amarillez y blancura	41
4.1.2	Análisis de Grasa en las fibras	46
4.1.3	Resistencia alcalina en muestras sin tratar y blanqueadas	48
4.2	Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas en fibras blanqueadas y teñidas mediante métodos convencional y ultrasónico.....	51
4.3	Evaluación mediante (SEM) de cambios morfológicos en las fibras blanqueadas y teñidas por métodos convencional y ultrasónico.....	62
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES		68
5.1	CONCLUSIONES.....	68
5.2	RECOMENDACIONES.....	68
BIBLIOGRÁFIA		69
ANEXOS.....		75

ÍNDICE DE TABLAS.

<i>Tabla 1. Clasificación taxonómica de la Alpaca.....</i>	22
<i>Tabla 2 Fase secuencial de la parte experimental</i>	31
<i>Tabla 3 Coeficientes para el índice de amarillez</i>	38
<i>Tabla 4 Coeficientes para el índice de blancura.....</i>	38
<i>Tabla 5 Índice de amarillez comparaciones por Tukey ± media y desviación estándar</i>	42
<i>Tabla 6 Índice de blancura comparaciones por Tukey ± media y desviación estándar.....</i>	44
<i>Tabla 7 Análisis de grasa en muestras sucias y desengrasadas</i>	46
<i>Tabla 8 Resistencia alcalina por cada tratamiento.....</i>	48
<i>Tabla 9 Propiedades físico-mecánicas en fibras sin tratar y blanqueadas</i>	52
<i>Tabla 10 Propiedades físico-mecánicas en muestras teñidas.....</i>	56
<i>Tabla 11 Comparación de los tratamientos blanqueados y posteriormente teñidas</i>	60

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Alpaca Suri.....</i>	22
<i>Figura 2 Estructura de la fibra de alpaca</i>	24
<i>Figura 3 Carda Manual.....</i>	25
<i>Figura 4 Desengrasado ultrasónico</i>	33
<i>Figura 5 Blanqueamiento convencional</i>	34
<i>Figura 6 Blanqueamiento ultrasónico</i>	34
<i>Figura 7 Teñido convencional.....</i>	35
<i>Figura 8 Teñido ultrasónico.....</i>	35
<i>Figura 9 Pruebas Físico-Mecánicas</i>	36
<i>Figura 10 Prueba de Solubilidad Alcalina</i>	37
<i>Figura 11 Microscopia Electrónica de Barrido.....</i>	39
<i>Figura 12 Fibras Blanqueadas por el método convencional y ultrasónico.....</i>	42
<i>Figura 13 Estructura morfológica de la fibra de alpaca.....</i>	63
<i>Figura 14 Evaluación de los cambios morfológicos en fibras blanqueadas y teñidas</i>	64
<i>Figura 15 Desengrasado convencional</i>	75
<i>Figura 16 Secado de muestras desengrasadas</i>	75
<i>Figura 17 Preparación de borohidruro de sodio</i>	75
<i>Figura 18 preparación de peróxido de hidrogeno</i>	75
<i>Figura 19 Blanqueamiento con borohidruro</i>	76
<i>Figura 20 Blanqueamiento con peróxido.....</i>	76
<i>Figura 21 Desengrasado ultrasónico</i>	76
<i>Figura 22 Muestras en el equipo de Soxhlet.....</i>	77
<i>Figura 23 Secado de muestras de grasa</i>	77
<i>Figura 24 Muestras en medio alcalino</i>	77
<i>Figura 25 Secado de muestras de alcalinidad</i>	77
<i>Figura 26 Teñido convencional.....</i>	78
<i>Figura 27 Teñido ultrasónico.....</i>	78
<i>Figura 28 Análisis de parámetros obtenidos en el Software SHIMADZU</i>	78
<i>Figura 29 Prueba físico-mecánica en muestra blanqueada</i>	78
<i>Figura 30 Prueba físico-mecánica en muestra teñida.....</i>	79
<i>Figura 31 Vista general</i>	79
<i>Figura 32 Vista de corte</i>	79

RESUMEN

La fibra de alpaca es una de las fibras de origen animal más apreciadas en la industria textil por sus propiedades físico-mecánicas, suavidad, brillo y otras características que la convierten en muy valorizada en el mercado. Esta fibra se compone de proteína de queratina con una estructura de cutícula, corteza y médula, es muy resistente, elástica y de tacto fino. Sin embargo, los métodos convencionales de blanqueamiento y teñido generan daños en su estructura morfológica. Partiendo de esta premisa, se consideró la alternativa de utilizar frecuencias ultrasónicas para mejorar la eficiencia de estos procesos y obtener una fibra teñida de alta calidad. El objetivo del estudio fue determinar los efectos del uso de agentes blanqueadores convencionales y la aplicación de ultrasonido en el blanqueamiento y teñido, evaluando los cambios en las propiedades físico-mecánicas y la morfología de la fibra de alpaca. Para ello, se compararon muestras tratadas con el método convencional y con ultrasonido en los procesos de desengrasado y blanqueamiento. En el blanqueamiento se utilizaron agentes como peróxido de hidrógeno y borohidruro de sodio en diferentes concentraciones, seguido del teñido con tinte catiónico. Para ambos tratamientos se aplicaron las mismas temperaturas, pero se emplearon tiempos distintos, ya que el ultrasonido redujo considerablemente el tiempo de exposición necesario para tratar las fibras. Posteriormente, se analizaron los índices de amarillez y blancura, la grasa presente en la fibra, la resistencia alcalina y las propiedades físico-mecánicas de las muestras blanqueadas y teñidas con la máquina universal SHIMADZU. Los resultados se evaluaron estadísticamente con ANOVA y prueba de Tukey ($p<0,05$) para determinar diferencias significativas entre los tratamientos. Los resultados mostraron que las fibras tratadas con ultrasonido presentaron índices más altos de blancura y menores de amarillez. Asimismo, estas muestras no tuvieron cambios significativos en sus propiedades físico-mecánicas después del blanqueamiento y teñido, a diferencia de las muestras convencionales. El análisis de los cambios morfológicos mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) demostró que las fibras teñidas por ultrasonido mantuvieron una superficie uniforme, con cutículas intactas y sin fisuras. En contraste, las muestras del método convencional presentaron erosiones y desprendimiento parcial de las escamas.

Palabras claves: Queratina, morfología, propiedades físico-mecánicas, cavitación ultrasónica, Microscopia electrónica de barrido (SEM)

ABSTRACT

Alpaca fiber is highly prized in the textile industry for its distinct physical-mechanical properties, including softness and luster, making it highly valuable in the market. Structurally, this fiber is composed of keratin protein organized into a cuticle, cortex, and medulla. While it is characterized by high durability, elasticity, and softness, conventional bleaching and dyeing methods often compromise its morphological integrity. Consequently, this study explored the application of ultrasonic frequencies to enhance process efficiency and ensure high-quality dyeing. The primary objective was to evaluate the effects of conventional bleaching agents versus ultrasonic application during bleaching and dyeing on the physical-mechanical properties and morphology of alpaca fiber. To this end, samples subjected to conventional methods were compared with those treated via ultrasound during degreasing and bleaching. Bleaching agents, such as hydrogen peroxide and sodium borohydride, were utilized at varying concentrations, followed by dyeing with a cationic dye. While temperatures remained constant across treatments, exposure times varied, with ultrasound significantly reducing the required processing time. Subsequently, yellowness and whiteness indices, residual grease content, alkaline resistance, and physical-mechanical properties were analyzed using a SHIMADZU universal testing machine. Results were statistically evaluated using ANOVA and Tukey's test ($p<0.05$) to determine significant differences between treatments. The findings indicated that ultrasound-treated fibers exhibited superior whiteness indices and reduced yellowness. Furthermore, unlike conventional samples, the ultrasound-treated fibers retained their physical-mechanical properties post-processing. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis revealed that ultrasonically treated fibers maintained a uniform surface with intact scales and no visible fissures. In contrast, conventionally treated samples exhibited scale erosion and partial detachment.

Keywords: Keratin, morphology, physical-mechanical properties, ultrasonic cavitation, scanning electron microscopy (SEM)



Reviewed by:

Mgs. Hugo Romero
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603156258

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes

De acuerdo con Huiman Cruz (2022), en la industria textil se genera una gran cantidad de contaminación ambiental, en buena parte por el uso excesivo de colorantes y sustancias químicas en el teñido. Durante estos procesos se producen residuos líquidos que contienen colorantes azoicos, hipocloritos y peróxidos, los cuales afectan gravemente los afluentes de agua dulce y, según algunos estudios, pueden representar un porcentaje significativo de la contaminación textil. Además, en países con una industria potente como Perú, dedicado a la fibra de alpaca, la normativa ambiental vigente no siempre logra contener estos peligros por la gestión inadecuada de los desechos químicos, lo que implica riesgos para la salud humana y el ecosistema.

Partiendo de esa premisa, se entiende que los procesos de teñido de fibras con métodos tradicionales son los que más contaminan los afluentes hídricos. Esto se debe principalmente a una aplicación incorrecta de los compuestos químicos utilizados. De este modo aparecen las tecnologías no tradicionales, en específico el teñido asistido con ultrasonido, el cual se presenta como una alternativa favorable.

Esta tecnología presenta varias ventajas, tales como la capacidad de reducir significativamente el uso desmedido de agua y energía. Asimismo, se usa menos cantidad de compuestos químicos en los procesos de blanqueamiento y teñido de fibras. En el blanqueamiento, a su vez, se generan resultados excelentes en la reacción de oxidación-reducción, principio básico del proceso. Con ello, se obtienen fibras de la más alta calidad.

Por esta razón, en investigaciones previas como la de Li, Lin, & Wang (2012), se señala que esta tecnología reduce considerablemente el impacto ambiental y genera una mejor resistencia de la fibra. Por ello, el ultrasonido se considera una opción viable para la optimización de procesos textiles sin dejar de lado la calidad del producto terminado.

El ultrasonido se ha presentado como una tecnología innovadora y sostenible. Los procesos asistidos por esta tecnología presentan mejorar significativas en el tratamiento de teñido de fibra, donde se genera uniformidad y profundidad del color de las fibras, asimismo, se reduce el impacto ambiental. Con la radiación ultrasónica, la cinética de transferencia de masa en el baño de teñido se acelera y también se produce una mejor fijación del color con recursos mucho más limitados.

Por otro lado, la cavitación dada por el ultrasonido promueve que los agregados del colorante se fragmenten en moléculas de menor tamaño, lo que redunda en una fijación mayor. Esto mejora la intensidad y estabilidad del color, como se ha comprobado con colorantes como el Vat Blue 4 en fibras celulósicas. En conclusión, este enfoque no solo optimiza recursos como energía y tiempo, sino que asegura un proceso más limpio y rentable, alineado con las demandas de sostenibilidad (Adeel et al., 2020).

En la investigación de Motaghi (2018), se determinó que el uso del ultrasonido en el proceso de teñido a comparación del método convencional, evidenciando que el ultrasonido tiene mejoras en comparación a estos métodos, debido a que, con esta tecnología se puede

usar temperaturas más bajas, además que se reduce los tiempos que se requiere con el propósito que se realice el proceso, con ello no se requiere el uso de agentes químicos complementarios para fijación del teñido y con ello obteniendo menos daño de las fibras durante el teñido.

En los resultados recabados se constató que los tratamientos que se realizaron en un ultrasonido obtuvieron mejores resultados en la fijación de los tintes a comparación de los convencionales. Demostrando que, el proceso resulta más económico y amigable con el ambiente, en vista de que se reducen el consumo desmedido de energía y productos químicos. Con ello el autor concluyó que el teñido de la fibra aplicando ultrasonido representa una alternativa sostenible y eficiente, que mejorar los productos obtenidos de las fibras naturales como la de alpaca, dejando muy por detrás a los métodos tradicionales (Motaghi, 2018).

En la presente investigación, se realizó el teñido de fibra de alpaca asistido por ultrasonido, comprobando que el tinte se fijó de mejor manera en la producción final, sumado a esto, que se redujo la contaminación en los procesos del tratamiento de la fibra desde el blanqueamiento hasta el teñido, con ello determinado que el uso del ultrasonido en el proceso del teñido de la fibra de alpaca será una opción viable para preservar el medio ambiente en el futuro.

1.2 Problema

El sector textil se establece como una industria de gran relevancia, no obstante, causan a nivel global, un impacto ambiental muy considerable. De acuerdo con estudios recientes se estima que la cadena de valor que se requiere para las confecciones de prendas textiles produce significativamente emisiones de gases de efecto invernadero, representando alrededor del 10% del total mundial, a su vez que se emplean desmedidamente recursos como agua y productos químicos (Filho et al., 2022).

La contaminación al ambiente se presenta con más frecuencia en los procesos de teñido textil. En donde, se emplean desmedidamente agua como el medio para la coloración, a su vez se utilizan grandes cantidades de agentes químicos para el proceso del teñido, los cuales producen efluentes líquidos altamente contaminantes. Dichos residuos, cuando no se gestionan correctamente, contaminan afluentes hídricos y ecosistemas, presentando así serios peligros para la salud de las personas (Castillo et al., 2023)

Dicha situación, no solamente se presenta en las gigantescas fábricas, sino que se manifiesta, igualmente, en entornos más reducidos y localizados. En Colombia, por ejemplo, un estudio sobre la huella ecológica de la industria textil mostró que únicamente el 33% de las industrias funciona bajo normativas orientadas a la sostenibilidad, lo que relega la magnitud del reto ambiental y tecnológico en la región (Sentená, 2021).

A pesar de lo que implicaciones ambientales, el sector textil afronta un reto estructural que se relaciona con la modernización de procesos de producción. En vista de que las fibras especialmente de alto valor, como la fibra de alpaca, los desafíos tecnológicos y ambientales toman mucha importancia, considerando que los métodos convencionales de

blanqueamiento y teñido, en donde se usan compuestos químicos fuertes, a altas temperaturas y por un tiempo prolongado, generan alteraciones en la estructura de la fibra afectando principalmente a las propiedades físico-mecánicas (Vaca-Cardenas et al., 2021)

De este modo surge la incorporación de tecnologías emergentes que optimicen los procesos, para que se optimice el proceso de producción. Razón por la cual aparece el ultrasonido como tecnología emergente, el cual, de acuerdo con estudios recientes a mostrado resultado en los procesos de manufactura de fibra, considerando las ventajas que tienen como son la difusión de colorantes, reduce los tiempos de proceso y disminuye el uso de agua y reactivos químicos, a su vez preservando las propiedades físico-mecánicas de la fibra, contribuyendo a un desempeño más sostenible (Hassan & Saifullah, 2023)

En comparación a la fibra de oveja, la cual posee un avanzado desarrollo tecnológico en los procesos, la fibra de alpaca aún no alcanza un nivel de valorización que la catapulte a mercados internacionales. Razón por la cual es fundamental preservar intactas las cualidades características de la fibra, las cuales se ven alteradas en las etapas de transformación, a causa de que estas constituyen un factor estratégico para la competitividad del producto y para el fortalecimiento de las economías locales que subsisten de esta producción (Serrano & Vilcapaza, 2023)

En tal sentido, el estudio con alternativas tecnológicas no convencionales que generen una reducción en el deterioro de las fibras naturales, a su vez generando menos impacto al ambiente, se transforma en una necesidad prioritaria. Entre esas alternativas, surge el uso del ultrasonido en los procesos de blanqueamiento y teñido, que representa una opción con alto potencial para generar eficiencia técnica, calidad del producto y sostenibilidad ambiental (Hassan & Saifullah, 2023).

De ese modo, la investigación se planteó responder a la siguiente pregunta:

¿Cuál es la diferencia que se genera al emplear el ultrasonido en los procesos de blanqueamiento y teñido, en cuanto a los cambios de los índices de amarillez y blancura, las propiedades físico-mecánicas y los cambios morfológicos de la fibra en comparación al proceso convencional?

1.3 Justificación

Actualmente, la industria textil enfrenta retos importantes que se relacionan con la sostenibilidad y la eficiencia ambiental en los procesos que implica la transformación de una fibra en un producto terminado, siendo el teñido uno de los más críticos (Yusuf, Shabbir, & Mohammad, 2017). Los métodos convencionales empleados para tratar las fibras de alpaca generan un daño considerable al ambiente y un alto consumo de recursos (Mozhagn Hosseinezhad et al., 2020). Por ello, la aplicación de tecnologías emergentes que subsanen estos problemas, son viables para generar la sostenibilidad que este sector requiere.

Una de las tecnologías a destacar es el uso del ultrasonido como una alternativa a los métodos tradicionales, en vista de que esta tecnología emergente optimiza varios de los procesos y genera un menor impacto al ambiente, del mismo modo que al tratarse la fibra de

alpaca podría impulsar de mejor manera el sector textil en las fibras de alpaca (Thakore, Smith, & Clapp, 1990).

Esta investigación es de suma importancia porque se profundiza en la optimización que se obtiene al aplicar el ultrasonido en el proceso de la manufactura de la fibra de alpaca teñida, recurso económico primario para muchas comunidades. Al optimizar el proceso de teñido con el ultrasonido, se reduce significativamente el uso de agua, energía y productos químicos. Adicionalmente, se obtienen productos de alta calidad que les abrirían la puerta a mercados de primera calidad, generando mejores ganancias para la economía de las comunidades que aprovechan este recurso (Harifi & Montazer, 2015).

Desde el ángulo ecológico, es crucial hallar alternativas tecnológicas que generen procesos sostenibles para el tratamiento de textiles. Los métodos convencionales de teñido son altamente contaminantes debido al elevado consumo agua y energía, además de generar agentes nocivos para los sistemas hídricos. El ultrasonido surge como alternativa para mitigar estos daños, a causa de las frecuencias ultrasónicas mejoran la fijación de compuestos químicos en procesos de blanqueamiento y teñido, consiguiendo con ello prácticas más sostenibles que no afectan significativamente al medio ambiente, logrando prácticas más sostenibles que reducen la huella ecológica del sector textil (Hosseinnezhad et al., 2022).

También se menciona un punto fundamental para el cuidado de la fibra de alpaca, el cual es mantener las propiedades físico-mecánicas que la fibra posee. Es de gran conocimiento que, la fibra de alpaca tiene una suavidad y durabilidad características, aunque, al aplicarse los métodos convencionales estos por lo general tienden a perderse, pero si se aplica la tecnología del ultrasonido se conservan estas características de la fibra, por ello, las industrias textiles consideran esta tecnología como viable para mejorar sus productos (Hassan & Saifullah, 2023).

Los que más se benefician de esta investigación son los productores primarios y artesanos que obtienen una mejora notoria en sus producciones, considerando que, obtienen productos con calidad alta y se reducen costos, con ello entregando a los consumidores productos de la más alta calidad, los cuales se producen de manera sostenible y que satisfacen la demanda de producto amigable con el ambiente. Además, de estas investigaciones se aportan datos valiosos para futuras investigaciones referentes al proceso sostenible para el sector textil (Thakore, Smith, & Clapp, 1990).

Por último, esta investigación tiene como objetivo dejar conocimientos científicos base para futuras investigaciones que hablen acerca del uso del ultrasonido en el teñido de fibra de alpaca, permitiendo que se den parámetros óptimos para el tratamiento de manera industrial de esta fibra. Esto permitiría entender el funcionamiento del ultrasonido y abriría paso a tecnologías emergentes poco convencionales que produzcan eficiencia productiva y sean amigables con el medio ambiente (Harifi & Montazer, 2015).

Con esto, se concluye que el papel que tiene el ultrasonido en el teñido de la fibra de alpaca mejora a comparación ciertos puntos críticos que tiene actualmente el sector textil. Con los resultados obtenidos del estudio se impulsaría estas tecnologías que generan

sostenibilidad en los procesos, lo que implica una mejora en la calidad de las fibras de alto valor como la de alpaca.

1.4 Objetivos

General

Evaluar el uso del ultrasonido en el proceso de tinturado de la fibra de alpaca y su efecto en las propiedades físico-mecánicas.

Específicos

- Evaluar la influencia de los procesos preliminares al tinturado en la fibra de alpaca, sobre las propiedades de color del material teñido resultante.
- Comparar procesos de teñido convencionales con el teñido asistido por ultrasonido sobre las propiedades físico-mecánicas de la fibra de alpaca.
- Analizar los cambios en la morfología de la superficie de las fibras de alpaca teñidas por distintas metodologías mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 MARCO REFERENCIAL

Rahman & Golam Nur (2014) tuvieron como objetivo de la investigación titulada "*Feasible Application of Modern Eco-Friendly Treatment of Wool Fabric before Coloration*" determinar la factibilidad de métodos ecológicos en telas de lana previamente a la fase de teñido, para establecer mejora en el cuidado del medio ambiente y la impregnación del tinte sin afectar la calidad de la fibra. La técnica enzimática empleada fue de lipasas y proteasas, que evitaron el uso de productos químicos fuertes. En los tratamientos, se usaron concentraciones, tiempos y temperaturas variables en las muestras de fibra. Posteriormente, se realizaron estudios de absorción del color, valoración de la uniformidad en el teñido y caracterización de las propiedades físicas de la fibra, como son la resistencia a la tracción y el encogimiento. Los resultados indican que los tratamientos enzimáticos se pueden utilizar para el tratamiento de la fibra y ayudan a que su color sea uniforme. También, se mostró una reducción en el impacto ambiental, por cuanto, se redujeron los residuos químicos generados. Concluyendo, que los tratamientos ecológicos dan alternativas sostenibles y eficientes en la producción de telas de lana antes del teñido.

Zhou et al. (2016) planificaron como objetivo de la investigación titulada "*Ultrasound-assisted chemical dissolution for quantitative analysis of wool in textile blends*" desarrollar y mejorar un tratamiento eficiente el tratamiento de lana en mezclas textiles aplicando soluciones químicas asistidas por ultrasonido. La técnica que se uso fue el tratamiento de mezclas textiles de lanas con fibras sintéticas o naturales con distintas mezclas de agentes químicos específicos y ultrasonido. Los análisis se realizaron modificando parámetros como la concentración del reactivo, la temperatura, el tiempo de exposición y la intensidad del ultrasonido. Se determinó la eficacia del tratamiento mediante la disolución de la fibra, la recuperación de fibras no disueltas y la cuantificación de las proporciones iniciales mediante análisis gravimétrico. Los resultados arrojados mostraron que el ultrasonido generó una aceleración considerable de la solución química, optimizando tiempo en comparación a su contraparte convencional. A su vez, el proceso generó una separación exacta y cuantificación reproducible de lana en mezclas textiles. Determinando así que el ultrasonido se presenta como una herramienta ágil y sostenible con el medio ambiente para el análisis cuantitativo de mezclas de lana de la industria textil.

Baaka et al. (2017) desarrollaron como objetivo de la investigación titulada "*Sustainability issues of ultrasonic wool dyeing with grape pomace colourant*" determinar la efectividad del uso del ultrasonido como alternativa para teñir lana con tintes naturales obtenidos del orujo de uva, estudiando la eficiencia del teñido y la sostenibilidad ambiental. La técnica que se empleó fue la extracción del tinte natural del orujo de uva por medio de tratamientos ecológicos para su posterior aplicación en el proceso del teñido asistido por ultrasonido. Se verificaron variables tales como: concentración del tinte, la intensidad del ultrasonido, la temperatura y el tiempo de teñido. También se compararon los resultados obtenidos con métodos convencionales a partir del aspecto de calidad del teñido, el consumo energético y generación de residuos. Los resultados permitieron indicar que el empleo de

ultrasonido mejora la absorción de colorante y reduce significativamente el tiempo y energía necesarios para el teñido, manteniendo la uniformidad y solidez de esta. Asimismo, este método presentó un menor impacto ambiental que los métodos convencionales, alcanzando una solución sostenible para la industria textil, lo que demuestra su potencial como técnica de estampación ecológica de lana, que genera un determinado beneficio ambiental.

Bahtiyari & Duran (2013) presentaron como objetivo de la investigación titulada "*A study on the usability of ultrasound in scouring of raw wool*" verificar la eficiencia del ultrasonido aplicado en el lavado de lana sucia, con el fin de mejorar la efectividad del proceso y reducir el impacto ambiental. El método que se usó para la investigación fue la comparación de lavado de fibra sin tratar entre tratamientos asistido por ultrasonido y tradicional, estudiando variables tales como: temperatura, concentración de detergente y tiempo de tratamiento. Igualmente, se estudiaron factores muy específicos, como la erradicación de las impurezas, la conservación de las propiedades físicas, la eficiencia del agua y de la energía. La hipótesis propuesta se verificó a través de los resultados obtenidos: el ultrasonido optimiza la eliminación de las impurezas y la grasa, lo que posibilita realizar una limpieza más eficaz. Se constató simultáneamente que el procedimiento no necesitó grandes volúmenes de detergente, agua y energía. Por lo tanto, se señala la capacidad del ultrasonido para desarrollar una tecnología eficaz y sostenible en la limpieza de fibras.

Adeel et al. (2020) presentaron como objetivo en su estudio titulado "*Ultrasonic assisted improved dyeing of cellulosic fabric using Vat Blue 4*" optimizar el teñido de fibras celulósicas empleando el ultrasonido, para mejorar la fijación del tinte Vat Blue 4 y reducir el daño al medioambiental. La técnica que se empleó consiste en la aplicación del ultrasonido durante el teñido, verificando las variables como: concentración del tinte, temperatura, tiempo del proceso e intensidad del ultrasonido. Los resultados mostraron que en comparación de los métodos de teñido tradicionales se mejoró la uniformidad y solidez del color, además, del consumo de agua y energía al aplicar los métodos asistidos por ultrasonido. También, el proceso de teñido fue más eficiente, debido a que, se redujo el tiempo en el teñido y el consumo de recursos. Concluyendo, que el empleo del ultrasonido presenta una alternativa sostenible para el teñido de tejidos celulósicos.

Motaghi (2018) planteó como objetivo de la investigación titulada "*An Economical Dyeing Process for Cotton and Wool Fabrics and Improvement their Antibacterial Properties and UV Protection*" efectuar un proceso de teñido económico en tejidos de algodón y lana, donde se mejore la calidad del color, añadiendo propiedades antibacterianas y de protección UV. La técnica que se empleó fue mediante el uso de colorantes naturales y agentes funcionales específicos que se usaron en el proceso de teñido, mejorando variables como: el tiempo, la temperatura y la concentración de reactivos. A su vez, se verificaron las propiedades antibacterianas y de protección mediante pruebas estandarizadas después del teñido. Los resultados demostraron que el tratamiento mejoró el teñido y mejorando la duración de este, además, que se mejoró las propiedades antibacterianas y la resistencia a la radiación UV de los tejidos, todo ello con un menor costo y un impacto ambiental reducido.

Czaplicki & Ruszkowski (2014) establecieron como objetivo de la investigación titulada "*Optimization of Scouring Alpaca Wool by Ultrasonic Technique*" optimizar el método de limpieza de la fibra de alpaca por medio de la técnica de ultrasonido, y en base a eso generar una mayor eficiencia en el proceso de eliminación de las impurezas con un menor impacto medioambiental. En la metodología se utilizó la técnica del ultrasonido asociado a detergentes ecológicos y se propusieron unas condiciones de trabajo por cada uno de los siguientes parámetros: la potencia de ultrasonido, la temperatura del baño, la concentración de detergente y el tiempo de procesado. A su vez, se compararon estos resultados con los de los métodos tradicionales en cuanto a limpieza, conservación de las propiedades de la fibra y consumo de recursos, demostrando que la limpieza ultrasonido era una técnica más rápida y efectiva, precisando además menos detergentes y agua, al mismo tiempo que las características naturales de la fibra de alpaca se mantenían en su estado natural. En conclusión, la técnica del ultrasonido puede considerarse una alternativa sostenible y eficiente para el tratamiento de fibras de alpaca.

Gürkan Ünal et al. (2019), en su investigación titulada "*The effect of using alpaca and silk instead of wool in weft yarns on the woollen fabric properties*", analizaron objetivamente el reemplazo de lana por alpaca y seda en los hilos de trama afectan las propiedades físicas, mecánicas y estéticas de los tejidos de lana. La técnica que se empleó para el estudio consistió en la producción de tejidos con distintas proporciones de alpaca y seda, después se analizaron las propiedades como resistencia, elasticidad, permeabilidad al aire y textura superficial. Los resultados demostraron que la fibra de alpaca mejoró la suavidad y calidez del tejido, por su parte la seda aumenta el brillo y la resistencia, pero ambos materiales reducen la resistencia al desgaste en comparación a la fibra normal. En conclusión, se determina que las mezclas de fibras son alternativas que personalizan las propiedades específicas de los tejidos de lana de acuerdo a lo que requiera el cliente.

Rehman et al. (2022), en su investigación titulada "*Statistical Optimization of Parameters for Eco-Friendly Dyeing of Cotton Using Direct Red 31 Dye*", plantearon como objetivo el mejoramiento de los parámetros del teñido con el tinte Direct Red 31 con un enfoque medioambiental. La técnica que usaron se basó en el diseño experimental estadístico por medio del método de superficie de respuesta (RSM), para determinar óptimas condiciones de pH, temperatura, tiempo de teñido y concentración de tinte. Los resultados mostraron que al optimizar este proceso se maximiza la absorción del tinte, además que se reduce el desperdicio y el impacto ambiental. A su vez, se obtuvo un teñido uniforme con una solidez de color excelente, mostrando que el análisis estadístico mejora la eficiencia y la sostenibilidad del proceso de teñido textil.

2.2 MARCO TEORICO

2.2.1 Alpaca

De acuerdo con Serrano & Vilcapaza (2023) la alpaca es un camélido sudamericano, que es muy apreciado por poseer una fibra de alta calidad, el cual es el único producto que se aprovecha de este animal. En la siguiente tabla se recopila información acerca de la taxonomía de la *Vicugna pacos* (Alpaca domestica).

Tabla 1.
Clasificación taxonómica de la Alpaca

Reino	Animalia
Filo	Chordata
Subfilo	Vertebrata
Clase	Mammalia
Orden	Artiodactyla
Suborden	Tylopoda
Familia	Camélidos
Tribu	Lamini
Género	<i>Vicugna</i>
Especie	<i>Vicugna pacos</i>

Alpaca Suri: La Alpaca Suri se diferencia por su sensibilidad al medio ambiente y por poseer una fibra más larga, fina y suave, que tiene un diámetro aproximado de 20 a 40 micras. Su apariencia denota una cierta característica, considerando que, a comparación del otro tipo de alpacas huacayas, esta presenta un vellón que cae por ambos lados de su cuerpo dejando al descubierto su columna vertebral. La fibra de este tipo de alpacas es muy cotizada en el mercado textil por su alta calidad (Serrano & Vilcapaza, 2023).

Figura 1
Alpaca Suri



2.2.2 Fibra de Alpaca

Definición de fibra de alpaca

Según Serrano & Vilcapaza (2023) “La fibra de alpaca es una fibra animal proveniente de la alpaca, una especie de camélido nativo de los Andes. Su principal ventaja es que tiene una gran variedad de colores naturales que la hacen ideal para productos textiles de lujo”.

Mientras que Huamani (2024) coincide en que “La fibra de alpaca es muy apreciada por su suavidad y características hipoalergénicas, especialmente para personas con piel sensible”.

Propiedades físicas y químicas de la fibra

Propiedades físicas

Los autores Serrano & Vilcapaza (2023) mencionan que en las propiedades físicas de la fibra de alpaca se incluyen:

- **Suavidad:** Alta suavidad al tacto, comparable con el cachemir.
- **Calidez y Ligereza:** Ideal para la confección de prendas ligeras y cálidas.
- **Resistencia y Elasticidad:** Alta resistencia a la rotura y elasticidad.
- **Hipoalergenicidad:** Apta para personas con alergias.
- **Finura:** La fibra varía de 18 µm (Baby Alpaca) a 31 µm (Huarizo).

En cambio, la autora Huamani (2024) explica acerca de:

- **Longitud:** Varía entre 7 cm a 28 cm dependiendo de la clasificación (Suri o Huacaya).
- **Lustre:** El brillo de la fibra es más evidente en las alpacas Suri, con un brillo dorado.
- **Higroscopia:** Propiedad de absorber vapor de agua, destacando que la alpaca Huacaya es más higroscópica que la Suri.

Propiedades químicas

Desde el punto de vista químico los autores Serrano & Vilcapaza (2023) describen los siguientes aspectos:

- **Acción del Agua:** Absorbe hasta un 34% de agua de su peso seco, lo que afecta la estructura de la fibra al romper los enlaces de hidrógeno.
- **Acción de Ácidos y Álcalis:** Los álcalis fuertes pueden degradar la fibra, mientras que los ácidos suaves como el fórmico no tienen gran impacto.

En comparación a la información de la autora Huamani (2024) donde explica acerca de:

- **Reactividad Química:** Añade más detalles sobre la afinidad de la fibra con álcalis y cómo estos afectan la queratina de la fibra. Los ácidos concentrados, como el sulfúrico, pueden dañar la estructura.

Características estructurales

De acuerdo con Saca (2023), la estructura de la fibra de alpaca se compone de las siguientes partes en específico:

- **Cutícula:** capa externa de la fibra, que tiene una disposición en una sola dirección, ya que la fibra se encuentra a punto hacia arriba, además, por ello se genera el abatanado, el proceso en el cual se enlazan las fibras por medio del cierre que genera los bordes libres en estas células.
- **Corteza (cortex):** es la parte principal de la fibra, la cual se compone de células en forma poligonal, que se encuentran ordenadas en forma vertical y que están unidas por fibrillas en disposición longitudinal. Dichas fibrillas se pueden fragmentar en unidades más pequeñas que son perceptibles mediante el lente microscópico, a estas fibrillas se las denomina microfibrillas.
- **Medula:** compone la parte central de la fibra, estando más visible en fibras gruesas, pero en fibras finas casi no se encuentra. Se forma del folículo piloso y se representa como un espacio longitudinal semivacío de estructura no definida.

Por su parte Serrano & Vilcapaza (2023), acotan en su investigación sobre la estructura de la fibra de alpaca se encuentra caracterizada por:

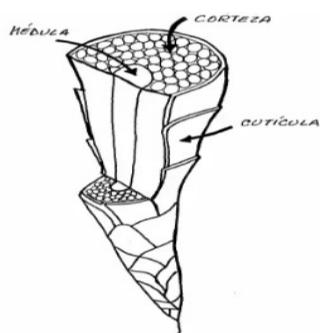
- **Cutícula:** La fibra está formada por células corticales internas y células cuticulares externas, que tienen una estructura compleja de capas.
- **Corteza y Médula:** Las células corticales constituyen el 90% de la fibra, aportando durabilidad y elasticidad.

En contraste la autora Huamani (2024) menciona sobre la estructura de la siguiente forma:

- **Cutícula:** Detalle más técnico sobre las tres capas de la cutícula (exocutícula, endocutícula y epicutícula) y su papel en la protección de la fibra.
- **Médula:** Explica que las fibras con médula completa suelen ser más gruesas y presentan mayor resistencia térmica.

Figura 2

Estructura de la fibra de alpaca



Características químicas de la fibra de alpaca

De acuerdo con Tapia (2023), la composición de las fibras proteicas consta de elementos químicos como el carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y azufre, los cuales se encuentran en la composición de la queratina, la proteína más importante de las fibras. La queratina se compone de moléculas y cadenas de péptidos conectados con enlaces salinos S-S, o grupos terminales, aminoácidos dibásicos y dicarboxílicos, que se crean por la cistina. Dicho contenido de cistina es la queratina, en el caso de esta proteína es más alto, por lo tanto, se generan características físicas y químicas propias de las fibras de los camélidos.

2.2.3 Escarmenado

El escarmenado es el primer paso para el tratamiento de la fibra de alpaca, este proceso consiste en el esponjamiento con la intención que la fibra se haga más ligera al momento de manipularla más adelante en los siguientes procesos. (Chanjí, Peche, & Aucahuasi, 2017)

Según León & Bojorque (2021), el proceso de escarmenado es la actividad en la cual se abren los mechones de la fibra y de donde se extraen impurezas, además que en ese proceso se separan y ordenan las fibras en una misma dirección. El escarmenado tiene dos alternativas para realizarlo, las cuales son manualmente y con apoyo, no obstante, nos enfocamos más en el escarmenado manual donde se menciona los siguientes:

- **Cardas manuales:** en este proceso se emplean paletas que poseen una superficie cubierta de púas o puntas de metal, comúnmente de 70 a 100 pulgadas (León & Bojorque, 2021).

Figura 3
Carda Manual



2.2.4 Desengrasado

De acuerdo con los autores Madara & Namango (2014) se entiende por desengrasado de lana como el aquel proceso crucial en el cual se realiza una transformación de la fibra como tal, donde se realiza un proceso en un medio acuoso, que será capaz de eliminar todas las impurezas presentes en la fibra como tal. Las impurezas comunes que se encuentran en las fibras por lo general son grasas, suciedad y otros contaminantes, que si no se los elimina en este procedimiento puede afectar a las etapas posteriores de producción de fibra, además que se busca que la fibra sufre el menor daño posible en dichas etapas de producción.

Por su parte los autores Kherdekar & Adivarekar (2017) menciona que el desengrasado de las fibras es un procedimiento fundamental, puesto que, en este se busca eliminar las

impurezas como suciedad y material vegetal, además de extraer la cera natural que poseen las fibras naturales. Este proceso es necesario a fin de que se preserve una alta calidad en el producto final.

2.2.5 Blanqueamiento

Por proceso de blanqueamiento se entiende que es aquel procedimiento donde decoloran las fibras, donde el objetivo principal de este procedimiento es despigmentar los compuestos colorantes por medio de un proceso de oxidación o reducción. Este proceso debe tener un sumo cuidado considerando que se debe trabajar con fibras largas que al momento de ser tratadas puedan ser transformadas en hilos y tejidos (Basu, Mishra, and Samanta, 2019).

Por su parte el autor Abdel-Halim (2012) menciona que el blanqueamiento de fibras textiles tiene como principal objetivo el producir tejidos blancos al eliminar los colorantes presentes en cualesquiera fibras mediante el uso de agentes blanqueadores. Este proceso es de tipo oxidativo o reductivo, y tiene el fin de obtener una blancura permanente en las fibras como tal preservando siempre la calidad de la fibra.

2.2.6 Teñido

Definición del teñido

Según Serrano & Vilcapaza (2023) “El teñido de la fibra de alpaca es un proceso complejo debido a la estructura de la fibra y su composición. Requiere el uso de colorantes adecuados para preservar sus propiedades”.

Por su parte Huamani (2024) “El teñido se realiza utilizando colorantes directos, pero se destaca que la fibra de alpaca necesita ser tratada con cuidado para evitar daños en su estructura interna”.

Parámetros que influyen en el teñido

De acuerdo con Serrano & Vilcapaza (2023) algunos de los parámetros que influyen son:

- **pH y Temperatura:** Los colorantes se aplican a temperaturas moderadas para evitar la degradación de la fibra. El pH alcalino debe ser controlado para evitar que se degrade la queratina.
- **Tiempo de Exposición:** El tiempo de exposición al colorante debe ser optimizado para no dañar la fibra.

Por otro lado la autora Huamani (2024) menciona que:

- **Afinidad de la Fibra con el Colorante:** La estructura de la fibra influye en cómo los colorantes se adhieren, siendo más eficaz el teñido en fibras finas como las de alpaca Baby.

Colorantes directos

Según Serrano & Vilcapaza (2023) “Los colorantes directos tienen grupos polares (-NH₃⁺ y -SO₃⁻) que permiten aplicarlos directamente en solución y adherirse a las fibras mediante interacciones electrostáticas o formación de sales. Su principal ventaja es su bajo costo”.

Los autores mencionan que, dentro de los colorantes directos, se destacan dos categorías:

1. **Colorantes ácidos:** Son aniónicos, solubles en agua y aplicables a tejidos como nailon, lana, seda y acrílico modificado. Tienen un punto isoeléctrico de 4.6, adquieren carga positiva a pH bajo y liberan aniones y sales del colorante.
2. **Colorantes básicos:** Son catiónicos, solubles en agua, y forman sales coloreadas que reaccionan con superficies aniónicas del sustrato, logrando buena fijación del color.

Ambos tipos de colorantes son fundamentales en el proceso de teñido de la fibra de alpaca, puesto que ofrecen opciones versátiles para obtener una variedad de colores y efectos estéticos en los productos finales.

2.2.7 Tecnologías Emergentes en la industria textil

De acuerdo con los autores Muthu & Gardetti (2016), algunas tecnologías emergentes que se consideran actualmente como alternativas amigables al medio ambiente que se aplican en la industria textil son las que se presentan a continuación:

Teñido asistido por enzimas

El teñido asistido por enzima utiliza enzimas que mejoran la absorción y fijación del tinte en las fibras, mayormente en fibras naturales como el algodón y seda. Esta tecnología ecológica reduce la dependencia de productos químicos fuertes, además que reduce el consumo de agua y energía, y da una mejor fijación del color. Empleando enzimas específicas, los fabricantes obtienen colores vivos ayudando al medio ambiente, lo que la hace una tecnología innovadora en el procesado textil sostenible (Muthu & Gardetti, 2016).

Teñido por tampón

El teñido en tampón por lotes consiste en un procedimiento continuo idóneo para fibras celulósicas tales como el algodón. El tejido tiene que pasar por un rebosado en el tinte, que hace que el proceso se agilice y se evite el exceso, además que se presente una correcta dosificación a fin de que se fije. Este método trabaja a temperatura ambiente, lo que ahorra energía y reduce el uso desmedido de agua a comparación a los métodos tradicionales. Al tener una gran eficacia y generar un menor impacto ambiental hacen que este teñido por lotes con tampón se le considere como una tecnología emergente en industria textil (Muthu & Gardetti, 2016).

Teñido asistido por plasma

En el caso del teñido asistido por plasma se basa en modificar la superficie de las fibras por medio de plasma para agilizar la fijación del tinte, específicamente en materiales sintéticos como el poliéster, En este método emplea grupos funcionales que mejoran la

afinidad del tinte, con ello se puede trabajar a baja temperatura sin aditivos químicos. Este procedimiento mejora la intensidad, la fijación del color y minimiza el consumo de agua y energía, es por ello que se convierte en una tecnología innovadora para la industria textil (Muthu & Gardetti, 2016).

Teñido asistido por láser

El teñido asistido por láser consiste en un láser que crea microestructuras en fibras sintéticas, agilizando la fijación del tinte y color. Este procedimiento consigue efectos superficiales únicos y reduce el uso de químicos. Al poseer una gran eficiencia energética y un reducido impacto ambiental, hacen que esta tecnología para teñir sea una alternativa sostenible e innovadora para la industria textil moderna (Muthu & Gardetti, 2016).

Teñido con dióxido de carbono supercrítico

En el teñido con dióxido de carbono supercrítico (scCO_2) se entiende que es un procedimiento que no requiere de agua y que emplea el CO_2 supercrítico como un disolvente para tintes, es ideal para fibras sintéticas como el poliéster. Este proceso genera un mayor empleo de tintes sin la generación de aguas residuales y trabaja a temperaturas bajas, lo que reduce el uso de energía. Al tener en cuenta todos estos aspectos se considera como una tecnología emergente que ayude al procesado textil ecológico (Muthu & Gardetti, 2016).

Teñido asistido por microondas

Otro caso de tecnologías emergentes es el teñido asistido por microondas, que usa la energía de microondas para acelerar el proceso de fijación del tinte en las fibras, principalmente en las sintéticas como el poliéster. Este método reduce el tiempo y el consumo de energía, al mismo tiempo mejora la intensidad y fijación de color. Su perspectiva amigable con el entorno reduce el uso de agua y sustancias químicas, lo que transforma el teñido asistido por microondas en una alternativa innovadora para una tinción textil efectiva (Muthu & Gardetti, 2016).

2.2.8 Tecnología del Ultrasonido

Fundamentos

El ultrasonido consiste en la formación de energía mecánica que necesita de un medio para expandirse. El efecto principal de esta tecnología consiste en la cavitación acústica, el cual es un procedimiento donde se colapsan las burbujas de gas que se forman en el líquido que se ha empleado, este fenómeno acelera las reacciones químicas, optimiza la transferencia de masa, disminuye los períodos de reacción y eleva la superficie de interacción entre los reactivos. Además, mejora la solubilidad de los compuestos y cambia las vías de reacción. Desde su descubrimiento en 1895, los ultrasonidos se han utilizado en muchos campos, incluida la industria textil, y se ha demostrado que tienen beneficios como la reducción de los tiempos de operación, el ahorro de energía y mejorar la calidad de los procesos de teñido y acabado (Harifi & Montazer, 2015).

Aplicaciones en la industria textil

El uso de ultrasonido en la industria textil ha mostrado ser altamente beneficioso en la mejora de los procesos de teñido, tanto con tintes sintéticos como naturales. El tratamiento optimiza la fijación de tintes en medio de las fibras textiles, generando un teñido uniforme y en menor tiempo de proceso. Asimismo, se ha constatado que el ultrasonido produce mejores extracciones de tintes naturales, agilizando el teñido en casos como la henna o índigo en fibras como la seda y el algodón. Esto se debe a la cavitación acústica, además el ultrasonido requiere de menos tiempo, temperatura y cantidad de tinte, generando un proceso más eficiente y económico (González et al., 2019).

Otro aspecto por mencionar es que el ultrasonido genera un mejor tratamiento de aguas residuales de los procesos textiles. Esto se debe al mejorar la adsorción de tintes en el agua, que con ayuda del ultrasonido genera una menor contaminación del agua, agilizando el proceso sin la necesidad de añadir productos químicos. Esto es posible gracias a la cavitación acústica, que genera una mejor transferencia de masa en el medio y eleva la eficiencia de los procesos de adsorción.

La técnica se ha convertido en una opción ecológica y económica, en vista de que no produce emisiones peligrosas y mejora la estabilidad operativa en el tratamiento de aguas residuales (Ealias & Saravanakumar, 2019)

Mecanismo de acción en el teñido

En el proceso de teñido, el ultrasonido funciona por medio de cavitación, donde se generan microburbujas que colapsan en el baño del tinte, formando ondas de choque y microcorrientes que dispersan de mejor manera el tinte al material. Este procedimiento obstruye la capa de dispersión del sustrato, haciendo que se reparta de manera uniforme en la masa. La oscilación de las burbujas aumenta el movimiento molecular, maximizando las reacciones fisicoquímicas, lo que mejora la fijación del tinte. También, se dice que el ultrasonido genera un menor desgaste en las fibras tratadas, conservando la calidad. El uso de esta tecnología emergente hace que se minimice la contaminación. Además que se ha demostrado su eficacia en una amplia variedad de fibras, como algodón, lana, acrílico y poliéster, mejorando la eficiencia del proceso y reduciendo costos (Muthu & Gardetti, 2016).

CAPÍTULO III. METODOLOGIA.

3.1 Tipo de Investigación.

El estudio tuvo un enfoque cuantitativo, dado que se ejecutó una recolección sistemática de datos numéricos por medio de mediciones precisas y analíticas fisicoquímicas controladas. La investigación se sustenta por la equiparación experimental de métodos convencional y asistido por ultrasonido en el tratamiento de teñido de fibra de alpaca, valorando variables específicas en cada etapa del tratamiento.

La investigación fue de naturaleza comparativa y explicativa, pues buscó contrastar la eficacia de dos métodos diferentes (convencional y ultrasonido), además que se comprendió y explicó los efectos del ultrasonido en las propiedades físico-mecánicas de la fibra. El diseño experimental contempla múltiples variables dependientes que serán medidas y analizadas, incluyendo:

- El contenido de grasa (mediante método Soxhlet).
- Propiedades físico-mecánicas de la fibra.
- Resistencia a los álcalis.
- Efectividad del blanqueamiento bajo diferentes concentraciones de agentes químicos.
- Cambios morfológicos en la estructura de la fibra (mediante análisis SEM).

3.2 Diseño Experimental

La investigación fue de tipo experimental, considerando que se buscó evaluar el efecto del ultrasonido como método alternativo en el proceso de teñido de fibra de alpaca y su impacto en las propiedades físico-mecánicas del material. El diseño experimental consistió en la aplicación de dos métodos de procesamiento (convencional y asistido por ultrasonido) en las diferentes etapas del tratamiento de la fibra, realizando cada procedimiento por triplicado para garantizar la confiabilidad estadística de los resultados.

En la **tabla 2** se indica los pasos que se desarrollaron de forma secuencial

Tabla 2
Fase secuencial de la parte experimental

1. DESENGRASADO		
Método	Convencional	Ultrasónico
Pruebas	Determinación Grasa por Soxhlet Pruebas Físico-Mecánicas Evaluación de captación de color	Determinación Grasa por Soxhlet Pruebas Físico-Mecánicas Evaluación de captación de color
2. BLANQUEAMIENTO		
Método	Convencional	Asistido por ultrasonido
Tratamiento	Peróxido de Hidrógeno al 6% y 3% Borohidruro de sodio al 0,25% y 0,15%	Peróxido de Hidrógeno al 6% y 3% Borohidruro de sodio al 0,25% y 0,15%
Pruebas	Pruebas Físico-Mecánicas Evaluación de captación de color Resistencia a Alcalinidad	Pruebas Físico-Mecánicas Evaluación de captación de color Resistencia a Alcalinidad
Muestras en total	6 muestras por cada tratamiento y se hace para 3 producciones en total 18 por cada reactivo.	6 muestras por cada tratamiento y se hace para 3 producciones en total 18 por cada reactivo.
TEÑIDO		
Método	Convencional	Asistido por ultrasonido
Teñido	Colorante Aniónico	Colorante Aniónico
Pruebas	Pruebas Físico-Mecánicas Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	Pruebas Físico-Mecánicas Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)
Muestras en total	72 muestras en total para este teñido.	72 muestras en total para este teñido.

3.2.1 Materiales y Equipos

Carbonato de sodio al 0,2%, peróxido de hidrógeno al 6 y 3% (v/v), borohidruro de sodio al 0,25 y 0,15% (m/v) (Thermo Fisher), pirofosfato (estabilizante del peróxido de hidrógeno), colorante aniónico (Drimaren azul marino CL-R), baño María, baño ultrasónico (ELMASONIC), colorímetro (CHN Spec DS-200 series), máquina universal (SHIMADZU), estufa (Memmert), microscopio electrónico de barrido SEM (Vega 3 Tescan), balanza analítica.

3.2.2 Procedimientos

Desengrasado

Método convencional

Se pesaron aproximadamente 2 g de la fibra de alpaca sucia. Posteriormente, se añadió el compuesto químico carbonato de sodio con una concentración del 0,2% para la eliminación de la grasa. La muestra se introdujo en un baño maría a 60 °C por un estimado de 20 min. Luego, se procedió a lavar la muestra desengrasada con agua a la misma temperatura del baño para retirar los residuos químicos y la suciedad de la fibra. Finalmente, se dejó secar la fibra en posición extendida a temperatura ambiente.

Método ultrasónico

Para el desengrasado asistido por el ultrasonido, también se pesaron 2 g de fibra de alpaca sucia. Se introdujo la fibra más agua destilada en el baño ultrasónico además del agente desengrasante (carbonato de sodio al 0,2%), para el tratamiento. El baño ultrasónico se programó a 60 °C durante 15 min. Las condiciones ultrasónicas que se utilizaron fueron una frecuencia de 37 kHz y una potencia de 150 W. Después, se procedió al lacado de la fibra con agua a 60 °C para asegurar la eliminación de residuos. Por último, la fibra se secó a la sombra y en posición extendida,

Blanqueamiento

Método convencional

Se pesaron 2 gramos de la fibra de alpaca previamente desengrasada, utiliza una balanza analítica. Para la formulación del baño de blanqueamiento, se prepararon soluciones con distintos agentes de blanqueamiento: peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en concentraciones del 6% y 3%, y borohidruro de sodio ($NaBH_4$) en concentración de 0,25% y 0,15%. Luego, se añadió la fibra desengrasada al baño y se dejó en inmersión durante 30 min. La temperatura de este proceso fue de 60 °C para el (H_2O_2) y 50 °C para el ($NaBH_4$). Posteriormente, se enjuagó la fibra con agua tibia durante 5 minutos para eliminar residuos. Finalmente, la fibra se expuso en una etapa de secado a temperatura ambiente durante 24 horas.

Método ultrasónico

El proceso comenzó de manera similar, donde se pesaron 2 gramos de la fibra de alpaca. Las muestras se colocaron en vasos de precipitado para la aplicación de los agentes de blanqueamiento. Se aplicó una solución que contenía peróxido de hidrógeno o borohidruro de sodio como agentes. La etapa clave fue el baño ultrasónico, que se realizó a una temperatura de 60 °C para el (H_2O_2) y 50 °C para el ($NaBH_4$), por un tiempo de 20 minutos, con una frecuencia ultrasónica de 37 kHz y con una potencia ultrasónica de 150 W. Para finalizar, la fibra se enjuagó con agua tibia por 5 minutos y se secó a temperatura ambiente durante 24 horas.

Teñido

Método convencional

Se pesaron 2 g de la fibra de alpaca proveniente del blanqueamiento convencional. A continuación, la muestra se colocó en una solución de 80 ml de agua destilada. De forma paralela, se preparó la solución de tinte, donde se disolvió 0,1 g de tinte en 20 ml de agua destilada, completando un volumen final de 100 ml para los 2 g de fibra, a su vez se ajustó el pH a 4. La solución de tinte, junto con la fibra, se introdujo en un baño maría a 80 °C, donde permaneció durante un tiempo estimado de 60 min. Posteriormente, se realizó el lavado de la fibra teñida con agua fría para retirar el exceso de tinte. Finalmente, la fibra se expuso a una etapa de secado en sombra en posición extendida.

Método ultrasónico

Para el método asistido por ultrasonido, se pesaron 2 g de fibra de alpaca blanqueada. La muestra se introdujo en una solución de 80 ml de agua destilada. Similar al método anterior, se preparó la mezcla de tinte disolviendo 0,1 g de tinte en 20 ml de agua destilada para alcanzar los 100 ml totales, a su vez se ajustó el pH en 4 en la solución. Luego, esta solución con la fibra se introdujo en un baño ultrasónico a 80 °C durante un tiempo estimado de 30 minutos. Las condiciones ultrasónicas fueron de una frecuencia de 37 kHz y una potencia de 150 W. Tras la inmersión, se lavó la fibra con agua fría para eliminar el exceso de tinte, y para finalizar, se dejó secar a la sombra y en posición extendida.

3.2.3 Diagramas de Flujo

Las imágenes que se presentaron a continuación reflejan cada una de ellas los procesos que se emplearon para el tratamiento de la fibra para llegar a la fase de teñido de la fibra, del método convencional y del método asistido por ultrasonido, en cada imagen se encuentran los pasos y el nombre del proceso que se describe.

Figura 4
Desengrasado ultrasónico

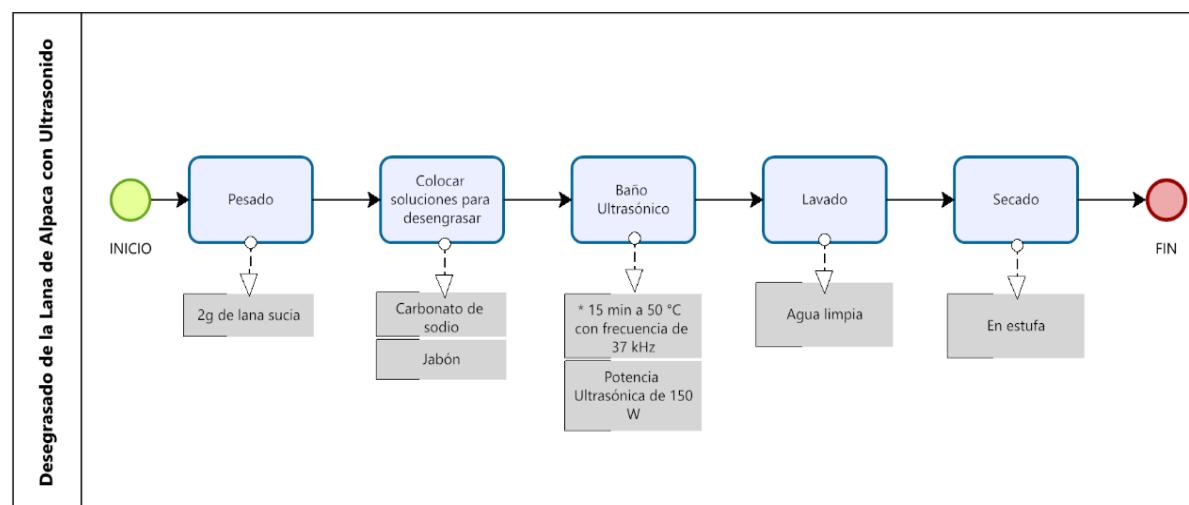


Figura 5
Blanqueamiento convencional

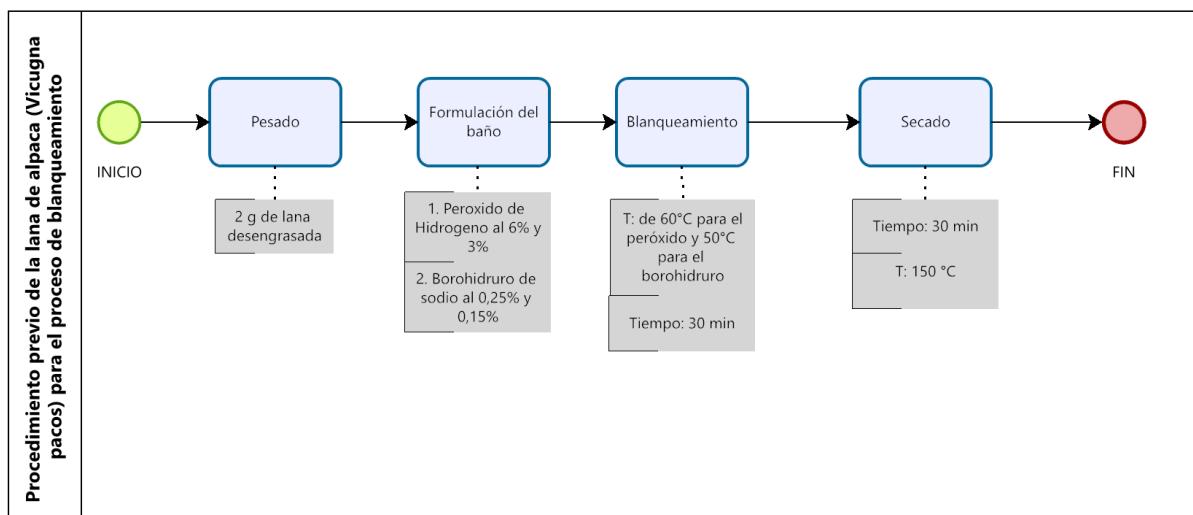


Figura 6
Blanqueamiento ultrasónico

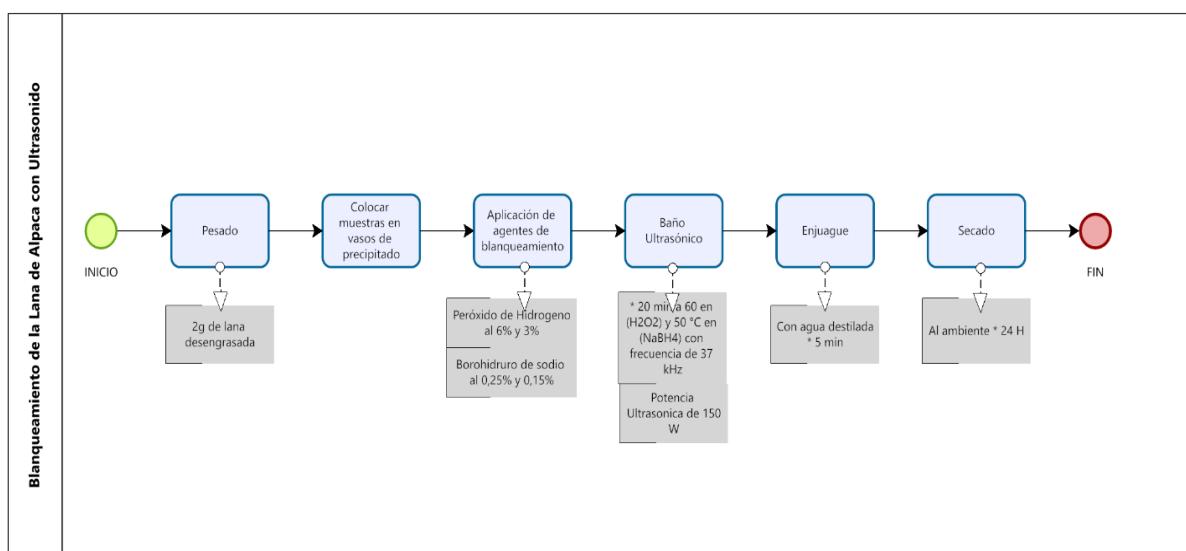


Figura 7
Teñido convencional

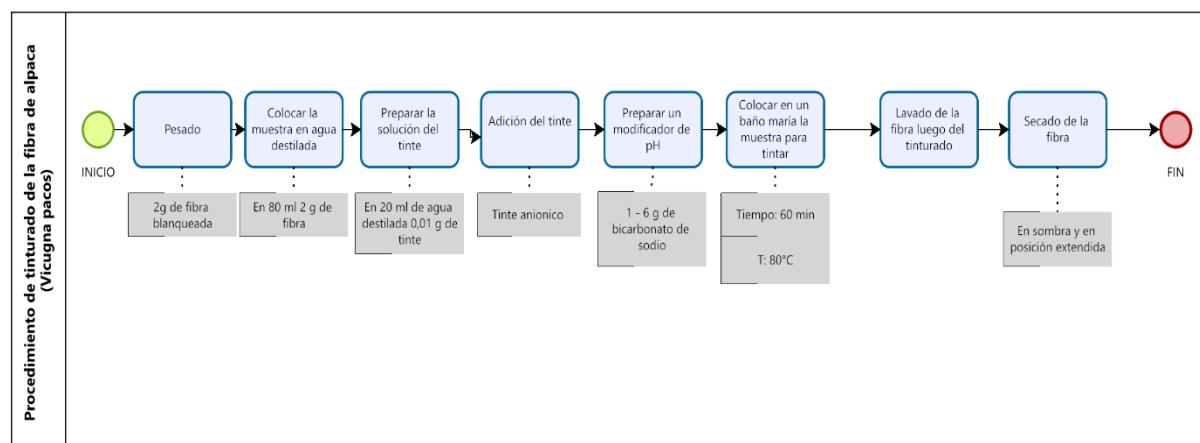
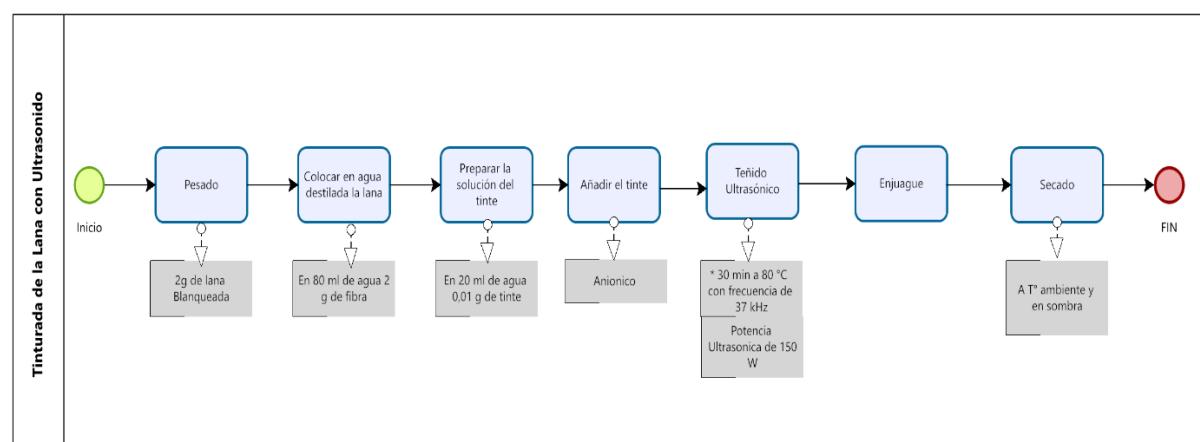


Figura 8
Teñido ultrasónico



3.3 Técnicas de Recolección de Datos

Los datos se obtuvieron a través de análisis físico-mecánicos, pruebas químicas y análisis morfológicos de la fibra de alpaca en sus diferentes etapas de procesamiento.

3.3.1 Análisis de Contenido de Grasa

Se utilizó el método Soxhlet según la norma ASTM D2257 para determinar el contenido de grasa en las fibras de alpaca. El equipo Soxhlet es un sistema de extracción líquido-sólido que permite determinar el contenido de grasa mediante ciclos de extracción con solvente. El procedimiento consistió en:

Se pesó 1 g de fibra de alpaca sucia, fibra desengrasada con método convencional y método asistido por ultrasonido. Luego, se introdujeron en una cápsula de papel filtro. Se añadieron las muestras al aparato de soxhlet junto a 100 ml de hexano. Se calentó a 80 °C y se dejó que se realice el proceso por un estimado de 3 h. Después, de haber realizado el tratamiento, se retiró la cápsula pasada las 3 h y se enjuagó con agua tibia. Finalmente, se

dejó secar la muestra en la estufa por unos 45 min y se pesó la muestra de fibra para cada uno de los casos.

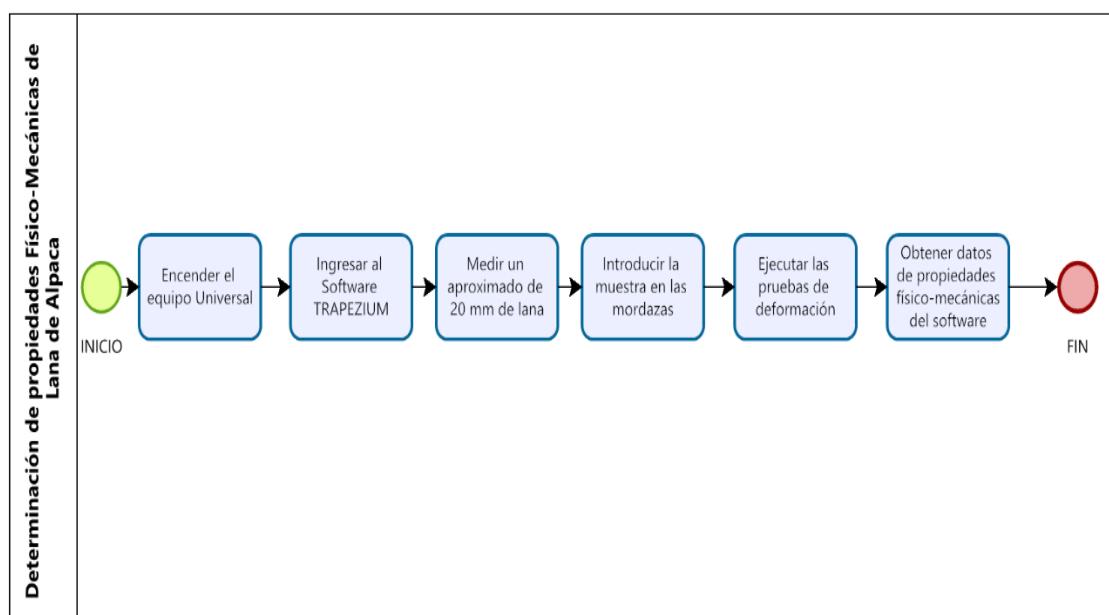
3.3.2 Análisis Físico-Mecánico

El método para calcular las propiedades físico-mecánicas en la fibra de alpaca según Jankowska et al. (2019) en el documento titulado “Comparison of physico-mechanical properties of fibre and yarn made of alpaca, sheep, and goat wool” se obtuvo mediante el uso de la máquina de ensayo universal (Instron –5965) utilizando mordazas tipo mandíbula.

La determinación de las propiedades físico-mecánicas se realizó en los laboratorios del Instituto Chino Ecuatoriano de Biodiversidad y Biotecnológico, Agropecuario y Forestal (ICEBBAF), ubicado en las ESPOCH.

Se utilizó una máquina universal marca (SHIMADZU) con el software (TRAPEZIUM) la cual determinó las propiedades físico-mecánicas de la fibra de alpaca, en donde se siguió el proceso descrito en la figura 6.

Figura 9
Pruebas Físico-Mecánicas



Procedimiento

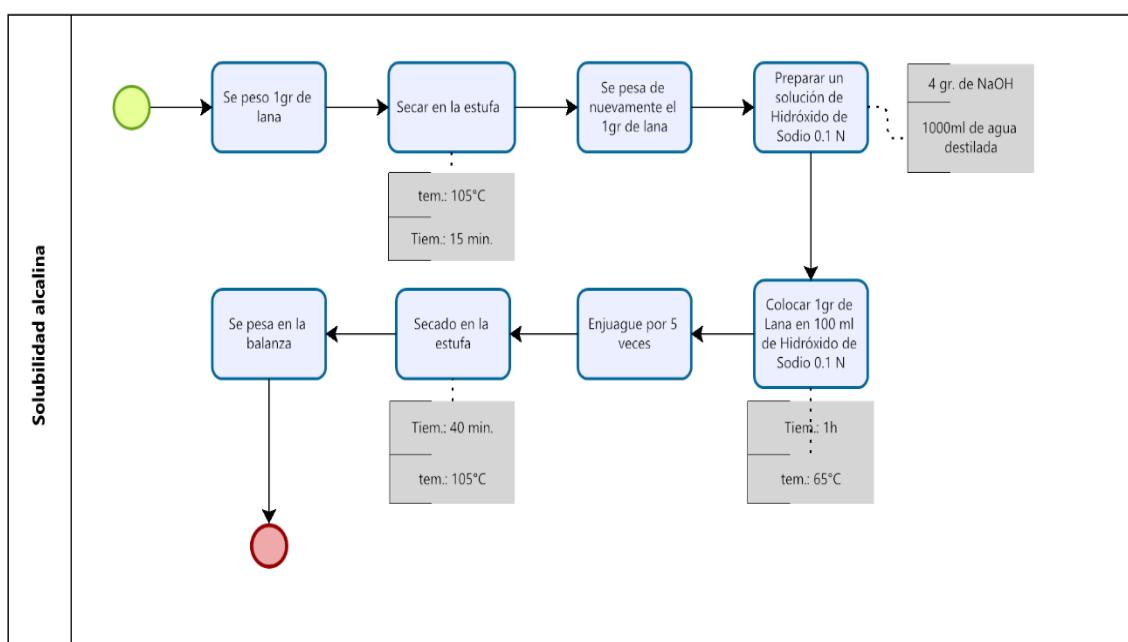
- **Encendido:** se encendió el equipo universal SHIMADZU y se taró la celda de carga para eliminar cualquier fuerza residual.
- **Programación:** se ingresó al software TRAPEZIUM y se escogió el método de ensayo de tracción.
- **Preparación de muestras:** se midió 20 mm fibra de todos los procesos (fibra cruda, desengraso, blanqueamiento y teñido).

- **Ajuste:** se ajustaron las muestras con las mordazas de la máquina universal, habiendo asegurado que la longitud fuera de 20 mm. Se aplicó una precarga inicial para tensar las muestras.
- **Ensayos:**
 - Ajustes del ensayo:** El ensayo se programó con una longitud calibrada de 20 mm, una velocidad de ensayo de 20 mm/min y la condición de parada fue la ruptura de la muestra.
 - Mediciones:** Al comenzar con el ensayo de tracción, el software TRAPEZIUM dictó automáticamente las propiedades físico-mecánicas. Los parámetros y unidades que se midieron y calcularon fueron: Fuerza de ruptura = N; Máximo desplazamiento = mm; Máximo esfuerzo = cN/tex; Máxima deformación=%; Módulo de elasticidad = MPa.
- **Obtención de datos:** Se recopilaron y exportaron los datos obtenidos a partir del software TRAPEZIUM para su posterior análisis estadístico.

3.3.3 Pruebas de Solubilidad Alcalina

El método de solubilidad en álcali se basó en el artículo desarrollado por Harris & Smith (1936) en el artículo titulado “Oxidation of wool: Alkali solubility test for determining the extent of oxidation.” en donde se siguió el proceso descrito en la figura 7.

Figura 10
Prueba de Solubilidad Alcalina



Procedimiento

- **Pesado:** se coloca 1 g de la muestra de lana.
- **Secado:** se lleva la muestra a una estufa por 15 minutos a 105 °C.
- **Pesado:** se pesa nuevamente la muestra de lana.

- **Preparación de solución:** se agrega 4 gramos de Na (OH) y se afora en 1 000 ml obteniendo una solución de Na (OH) 0.1 N.
- **Solubilidad:** en un vaso que contiene 100 ml de hidróxido de sodio 0,1 N a 65 °C se coloca el 1 g de lana. Después de 1 hora, se filtra el contenido.
- **Enjuague:** se enjuaga 5 veces con agua destilada.
- **Secado:** se secará a 115 °C por 40 minutos. Una vez que se enfrié en el desecador, se pesa y calcula la reducción de peso.

3.3.4 Cálculo de los índices de blancura y amarillamiento en fibras

Índice de Amarillez y Blancura

Para calcular los índices de blancura y amarillez se aplicó el procedimiento descrito por la norma ASMT E313-20 “Standard Practice for Calculating Yellowness and Whiteness Indices from Instrumentally Measured Color Coordinates”.

Para lo cual se utilizó el equipo Colorímetro CHN Spec DS-200 series, en donde se obtuvieron las coordenadas de la escala X, Y, Z y ASTME E-10, con las cuales se aplicaron las siguientes ecuaciones para la determinación de los diferentes índices:

Ecuación para calcular el índice de amarillez:

$$YI = 100 * \frac{C_X X - C_Y Z}{Y}$$

Tabla 3

Coeficientes para el índice de amarillez

Coeficientes	Valor
C_X	1.3013
C_Y	1.1498

Ecuación para calcular el índice de blancura:

$$WI = Y + (WI, x)(x_n - x) + (WI, y)(y_n - y)$$

Tabla 4

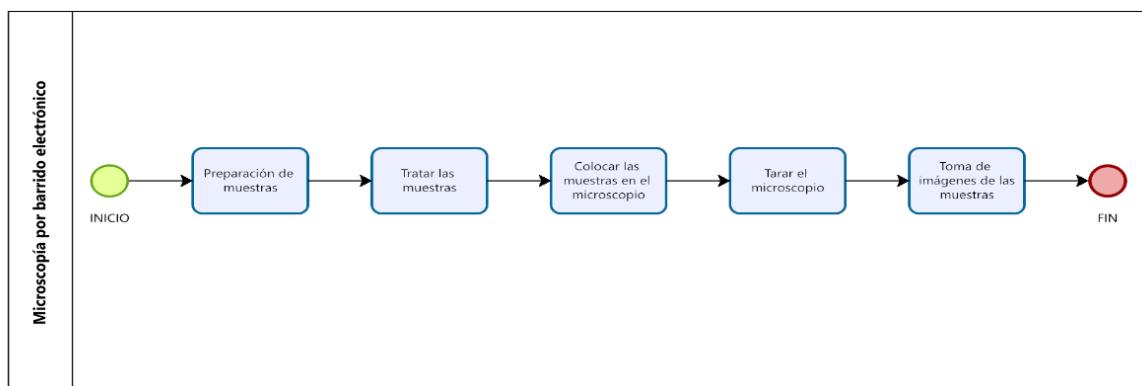
Coeficientes para el índice de blancura

Coeficientes	Valor
x_n	0.3101
y_n	0.3161
WI_x	800
WI_y	650

3.3.5 Microscopía por barrido Electrónico

El método de determinación de Microscopía por barrido electrónico se basó, según Hurren, Cookson, & Wang (2008), en el artículo titulado “The effects of ultrasonic agitation in laundering on the properties of wool fabrics” en donde se siguió el proceso descrito en la figura 9.

Figura 11
Microscopía Electrónica de Barrido



Procedimiento

- **Preparación de muestras:** Se extrae una cantidad mínima de lana para adherir al portaobjetos.
- **Tratar las muestras:** Las muestras son sometidas a baños de oro.
- **Colocación de muestras:** Las muestras se insertan en los lugares asignados.
- **Tasar el microscopio:** se elimina la humedad y la presión de la cabina del microscopio.

3.4 Técnica de análisis

Los datos se analizaron por medio de ANOVA de un factor para cada parámetro evaluado. Además, las comparaciones múltiples se realizaron mediante la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 5$). Todo esto se ejecutó utilizando el software estadístico Statgraphics Centurion 18. A continuación, para facilitar la comprensión de las técnicas de análisis de datos empleadas en el componente estadístico del estudio, se describen brevemente:

- **ANOVA:** El análisis de varianza o ANOVA (Analysis of Variance) se refiere al análisis de medidas repetidas que reducen la variabilidad debida a diferencias entre sujetos, técnica que resulta particularmente precisa para estudiar cambios a lo largo del tiempo o bajo diferentes condiciones experimentales. Este método de análisis permite manejar diseños más complejos que emplean componentes intra-sujetos y multifactoriales entre sujetos, lo cual posibilita una examinación exhaustiva de los diferentes efectos, tales como tratamientos o condiciones específicas a los que se haya expuesto un sujeto de estudio (Larson, 2008).

- **Tukey:** Usa el estadístico del rango analizado para realizar las comparaciones por parejas entre grupos. Este análisis define la tasa de error por ensayo como la tasa de error de las comparaciones que se equiparan entre sí (Nanda et al., 2021).

3.5 Población y Tamaño de Muestra

El vellón de alpaca, que se empleó para el estudio, fue de una alpaca que presento las siguientes características:

- **Sexo:** Macho
- **Edad:** 5 años
- **Especie:** Suri
- **Color de la fibra:** Gris

En cuanto al tamaño de la muestra, para el estudio se empleó tres producciones distintas de fibra, asegurando así la representatividad de la materia prima. Cada una de las producciones de fibra se evaluó con seis réplicas ($n=6$) para cada condición de tratamiento. Las réplicas se aplicaron a dos agentes de blanqueamiento y con diferentes concentraciones (peróxido de hidrógeno al 6% y 3%; borohidruro de sodio al 0,25% y 0,15%).

A su vez, toda esta combinación de variables se duplicó para ser probada bajo dos métodos de blanqueamiento y posterior teñido de la fibra: método convencional y método asistido por ultrasonido.

El número total de muestras tratadas se calculó de la siguiente manera:

- **Variables:** 3 producciones de fibra x 6 réplicas x 2 agentes de blanqueamiento x 2 concentraciones x 2 métodos.

El número de muestras analizadas para el método convencional fue de 72 muestras en total. El método asistido por ultrasonido utilizo el mismo número, sumando asimismo 72 muestras.

- **Cálculo inferido (por cada método):** 3 producciones x 6 réplicas x (4 Tratamientos/concentraciones) = 72 muestras.

A su vez, para el estudio se tomó en cuenta que la fibra que se empleó fue de la misma alpaca, durante todo el proceso, empezando del desengrasado hasta el proceso de teñido de la fibra.

3.6 Hipótesis

H0. El uso del ultrasonido en los procesos de blanqueamiento y teñido de fibra de alpaca preserva mejor las propiedades físico-mecánicas y morfológicas en comparación con los métodos convencionales.

H1: El blanqueamiento asistido por ultrasonido mantiene mayor resistencia a la tracción que el método convencional.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Procesos preliminares previos al teñido de la fibra

Para el desarrollo del trabajo el primer paso que se ejecutó son los tratamientos previos al teñido, donde se abarca el desengrasado de la fibra de alpaca tanto por el método convencional y ultrasónico. Además, del blanqueamiento de la fibra con peróxido de hidrógeno y borohidruro de sodio en distintas concentraciones, de donde se realizaron análisis para determinar la eficiencia que tiene cada método.

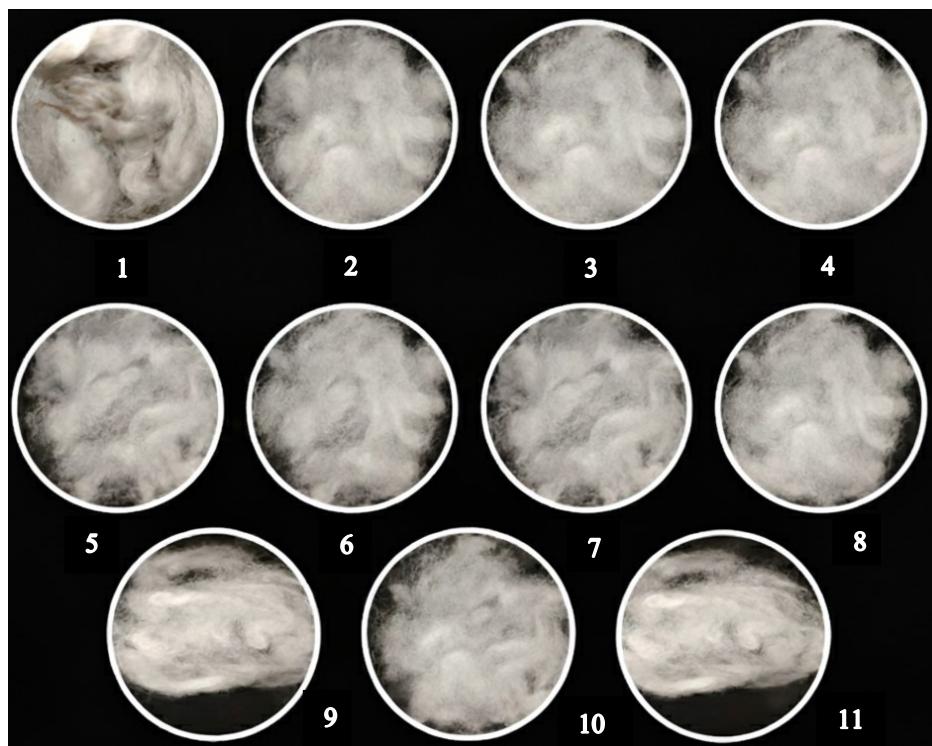
4.1.1 Resultados de índice de amarillez y blancura

Se realizaron pruebas de blanqueamiento en la fibra de alpaca empleando cuatro formulaciones distintas, en donde se incluyeron dos concentraciones de peróxido de hidrógeno y dos concentraciones de borohidruro de sodio. Como referencia se empleó una solución inicial de referencia de peróxido de hidrógeno al 6%. Este tratamiento funcionó como el estándar de calidad con el cual se debe comparar las otras concentraciones, tanto en el método convencional y ultrasónico.

En investigaciones previas se constató, el uso del borohidruro de sodio como agente de blanqueamiento en fibras vegetales y animales de acuerdo con Yilmazer & Kanik (2009), además, que realizaron los respectivos análisis del índice de amarillez en la fibras a las que se trató con este agente blanqueador, dando como resultado un estimado de 17,6 de índice de amarillez en las muestras de fibra de oveja a la que se trató para la investigación que el autor abordo. Por otro lado, Çiçekler & Tutus (2023) mencionaron en el empleo en pulpas de *Pinus brutia* y paja de trigo, elevaron la blancura ISO que se mantuvo en un rango de 35% y 50%, además que se redujo la amarillez, esto se atribuye a la conversión grupos carbonílicos ($C=O$) en hidroxilos ($C-OH$) y a la erradicación de especies catalíticas. No obstante, al combinar de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y $NaBH_4$ se indicó sinergia considerable en el tratamiento de modificación fibrilar. Boyaghchi & Achachlouei (2023) mencionaron que el borohidruro de sodio se comportó como un agente protector al transformar los enlaces $C=O$ en $C-O$ y disminuir la absorción en el rango de 1640 cm^{-1} , mientras que el tratamiento con peróxido de hidrógeno incrementó alrededor de 25 unidades el factor L^* (luminosidad). Además, Dang, Elder, & Ragauskas (2007) demostraron que, aunque el tratamiento con peróxido alcalino incrementó la carga fibrilar en un 16.6%, también comprometió la viscosidad intrínseca, especialmente a altas temperaturas ($90^\circ C$). El hecho se ve afectado considerablemente al verificar las observaciones de Ramos, Calatrava, & Jiménez (2008), ya que ellos impulsaron que el 50% del peróxido empleado en tratamiento convencional se disipa en reacciones secundarias que no influyen en el blanqueamiento, mostrando así las limitaciones inherentes de los tratamientos químicos fuertes. Estas referencias confirman que $NaBH_4$ y su combinación con H_2O_2 pueden agilizar significativamente las propiedades.

De acuerdo con los datos obtenidos en las variables del índice de amarillez y blancura en el proceso de blanqueamiento por el método convencional y asistido por ultrasonido, se obtuvo los datos que se describe en las **tablas 5 y tabla 6**.

Figura 12
Fibras Blanqueadas por el método convencional y ultrasónico



Nota: 1: sin tratar; 2: desengrasado convencional; 3: desengrasado ultrasónico; 4: peróxido al 6%; 5: peróxido al 3%; 6: borohidruro al 0,25%; 7: borohidruro al 0,15%; 8: peróxido al 6% ultrasónico; 9: peróxido al 3% ultrasónico; 10: borohidruro al 0,25% ultrasónico; 11: borohidruro al 0,15% ultrasónico.

Tabla 5
Índice de amarillez comparaciones por Tukey ± media y desviación estándar

TRATAMIENTO	ASTME 313
SIN TRATAR	18,58 ± 0,93 ^f
DES. CV	16,92 ± 0,66 ^e
DES. ULT	16,51 ± 0,55 ^e
P6% CV	10,67 ± 0,84 ^{ab}
P3% CV	11,72 ± 0,82 ^{bc}
B0,25% CV	16,27 ± 0,18 ^{de}
B0,15% CV	15,71 ± 1,21 ^{de}
P6% ULT	9,84 ± 0,98 ^a
P3% ULT	9,90 ± 0,96 ^a
B0,25% ULT	15,70 ± 0,78 ^d
B0,15% ULT	15,25 ± 0,92 ^d

Nota: DES. – desengrasado, CV-convencional; ULT-ultrasónico; P-peróxido de hidrogeno en distintas concentraciones; B-borohidruro de sodio en distintas concentraciones; Valores referentes a la media ± desviación estándar; ^{a-b-c-d-e-f}: grupos estadísticos, ($P<0,05$).

Análisis

Al analizar estadísticamente los datos obtenidos en el índice de amarillez que corresponde a la **tabla 5**, se verificó que los valores más altos son los que se obtuvieron en las repeticiones de la fibra de alpaca **SIN TRATAR**, esto se debió en parte a que la fibra conserva aún los pigmentos originales de la fibra como tal, en vista que está en principio es una fibra de color gris, además, que la fibra también posee agentes contaminantes y la grasa que posteriormente se extrajo en el proceso del desengrasado.

Para el caso de la fibra del desengrasado por ambos métodos tanto por el método convencional (**DES. CV**) y asistido por ultrasonido (**DES. ULT**), se denotó que dichas fibras al realizar los análisis correspondientes están en un rango de 16 y 17, solo unos 2 grados menos del valor que se obtuvo en la fibra cruda. Además, en este rango se acercó la fibra blanqueada con una concentración de 0,25% de borohidruro de sodio (**B0,25% CV**) (m/v) por el método convencional.

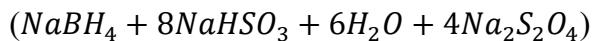
El siguiente rango se encontró en 15 y en este rango se identificaron a las fibras blanqueadas con el borohidruro de sodio con distintas concentraciones, en este caso se encuentra la muestra blanqueada con una concentración de 0,15% de borohidruro (**B0,15% CV**) por el método convencional (m/v) y las muestras blanqueadas con las mismas concentraciones de borohidruro al 0,25% y 0,15% (**B0,25% ULT** y **B0,15% ULT**) (m/v) por el método asistido por ultrasonido.

El que la fibra blanqueada con borohidruro al 0,25% convencional se acercara al rango de las fibras desengrasadas se debe a que este compuesto es en sí más bien un agente complementario para el blanqueamiento con agentes naturales de blanqueamiento. Las muestras con borohidruro asistidas por ultrasonido mejoraron con respecto a su contraparte convencional, aunque no por una diferencia notable.

Discusión

En el caso de los tratamientos con peróxido de hidrógeno es más notorio el cambio que estas obtuvieron con respecto al valor del desengrasado del mismo método convencional. Se determinó que los tratamientos de peróxido fueron los más efectivos, concluyendo que estos fueron los más efectivos si en términos de tener el menor índice de amarillez se refiere. Esto debido a que el ultrasonido intensificó la cavitación de los compuestos químicos que producen el color blanco característico de una fibra blanqueada (Li et al., 2022).

Además, la reacción oxidante del peróxido de hidrógeno generó la descomposición de la melanina de la queratina, en contraste, se generan daños en las cutículas y los puentes de cistina responsables de la resistencia mecánica (Cardamone, Yao, & Nuñez, 2004). En el caso de las fibras blanqueadas con borohidruro se produce la reacción de reducción que se da al formarse el ditionito, se tiene en cuenta que la reacción de reducción del borohidruro de sodio es:



El cuál es el mecanismo que genera el blanqueamiento similar al del peróxido de hidrogeno (Yilmazer & Kanik, 2009). Pero se tuvo en cuenta que las fibras que se trajeron y que se estudiaron estuvieron un poco más cerca a los datos que se obtuvo de las fibras sin tratar y las fibras desengrasadas.

Tabla 6

Índice de blancura comparaciones por Tukey ± media y desviación estándar

TRATAMIENTO	ASTME	CIE	AATCC
SIN TRATAR	$-8,58 \pm 0,45^a$	$-8,57 \pm 0,35^a$	$-8,54 \pm 0,39^a$
DES. CV	$10,25 \pm 1,06^b$	$10,25 \pm 1,07^b$	$10,23 \pm 1,11^b$
DES. ULT	$12,09 \pm 1,05^c$	$12,11 \pm 1,04^c$	$12,11 \pm 1,07^c$
P6% CV	$45,97 \pm 1,02^g$	$46,36 \pm 1,08^g$	$46,29 \pm 1,01^g$
P3% CV	$46,35 \pm 1,05^g$	$46,47 \pm 1,05^g$	$46,35 \pm 1,09^g$
B0,25% CV	$19,18 \pm 0,91^d$	$19,27 \pm 0,90^d$	$19,20 \pm 0,96^d$
B0,15% CV	$22,65 \pm 0,78^{de}$	$22,65 \pm 0,76^{de}$	$22,70 \pm 0,87^{de}$
P6% ULT	$51,42 \pm 0,52^h$	$51,36 \pm 0,53^h$	$51,41 \pm 0,49^h$
P3% ULT	$51,58 \pm 0,24^h$	$51,47 \pm 0,28^h$	$51,51 \pm 0,23^h$
B0,25% ULT	$41,46 \pm 0,31^f$	$41,65 \pm 0,29^f$	$41,50 \pm 0,33^f$
B0,15% ULT	$42,54 \pm 0,24^{fg}$	$42,51 \pm 0,28^{fg}$	$42,56 \pm 0,30^{fg}$

Nota: DES. – desengrasado, CV-convencional; ULT-ultrasónico; P-peróxido de hidrogeno en distintas concentraciones; B-borohidruro de sodio en distintas concentraciones; Valores referentes a la media ± desviación estándar; ^{a-b-c-d-e-f}: grupos estadísticos, ($P<0,05$).

Análisis

Al examinar los datos estadísticos que se obtuvieron en la toma del índice de blancura para cada uno de los tratamientos que aplicaron en la fibra de alpaca, se determinó que el valor más bajo que se obtuvo tanto en la norma ASTM como CIE y AATCC, fue el de la fibra **SIN TRATAR**, y esto tiene su lógica debido a que la fibra aún conserva parte del pigmento original de la fibra que era gris, además, que la fibra tiene en su composición la grasa y los agentes contaminantes que se encuentran presentes en la fibra en sí.

Por su parte, en el caso de los tratamientos de desengrasado, los datos obtenidos, estuvieron en un rango de 10 y 12, en el caso de desengrasado convencional (**DES. CV**) y del desengrasado ultrasónico (**DES. ULT**). En el caso de los tratamientos con borohidruro de sodio tanto el tratamiento borohidruro al 0,25% (**B0,25% CV**) como el borohidruro al 0,15% (**B0,15% CV**) (m/v) por el método convencional, se encontraron en un rango de 19 y 22.

Las muestras tratadas con el tratamiento de borohidruro de sodio con concentraciones de borohidruro al 0,25% y al 0,15% (**B0,25% ULT** y **B0,15% ULT**) (m/v) de concentración

m/v, aplicando el método asistido por ultrasonido, estuvieron en un rango de 41 y 42, estando por encima a sus contrapartes aplicadas con el método convencional.

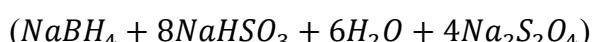
En este rango de entre >40, se encontraron a las fibras blanqueadas con diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno las cuales fueron las muestras tratadas con peróxido al 6% y al 3% (**P6%CV** y **P3%CV**) de concentración (v/v) por el método convencional, en vista que estas se hallaron en un rango de 45 y 46 de grado de blancura. Sin embargo, las muestras que se trataron bajo las mismas condiciones, pero empleando el método asistido por ultrasonido resultaron ser más efectivas, por el hecho que, estos tratamientos se encontraron en un rango estimado de 51, lo cual las convirtió en los tratamientos más eficaces para blanquear.

Las fibras están acorde a los parámetros que designan cada una de las normas ASTM, CIE y AATCC. Al haber analizado los valores estadísticos de cada uno de los tratamientos se denotó que las muestras tratadas con los métodos asistidos por ultrasonido fueron las que mejores resultados al momento de blanquear.

Discusión

En el caso de los tratamientos de desengrasado, esto en parte se determinó debido a que la fibra aún conserva parte del pigmento gris de la fibra original, además, que es más alto su grado de amarillez. Se determinó que el color blanco de los tratamientos con borohidruro convencional es un poco más tenue que el obtenido con los siguientes tratamientos, aunque, se considera blanqueado, al estar por encima de los valores del desengrasado, puesto que estos tienden a ser más bajos porque aún no se aplica el proceso de blanqueamiento correspondiente.

De acuerdo con Yilmazer & Kanik (2009), la acción de blanqueamiento del $NaBH_4$ consiste en la reacción de reducción que se da al formarse el ditionito, se tiene en cuenta que la reacción de reducción del borohidruro de sodio es:



El cuál es el mecanismo que genera el blanqueamiento similar al del peróxido de hidrógeno, conservando de mejor manera la fibra, además, el borohidruro de sodio reduce los enlaces disulfuro de la queratina liberando grupos (-SH).

Los tratamientos con borohidruro asistidos por ultrasonido fueron más efectivos, esto quiere decir que los tratamientos fueron más efectivas al aplicarse las frecuencias ultrasónicas hicieron que el borohidruro de sodio se fijara mejor en la fibra obteniendo un índice de blancura superior y de excelente calidad. De acuerdo con Li et al. (2022), al emplear el ultrasonido se potencia la cavitación de las reacciones químicas que tengan los compuestos que se empleen en cualquier proceso, por ello es que se denotó que el proceso fue más eficiente en este caso en particular.

Las muestras tratadas con peróxido asistidas por ultrasonido fueron más efectivas, esto en gran medida a que las frecuencias ultrasónicas cavitaron de mejor manera los iones

perhidroxilo (HO_2^-) que conlleva a una eficiencia en el proceso del blanqueamiento (Li et al., 2022).

De acuerdo con Cardamone, Yao, & Nuñez (2004), el ion perhidroxilo (HO_2^-) es el responsable que se genere el blanqueamiento oxidativo, el mecanismo de acción que este tiene conlleva a la oxidación y destrucción de pigmentos de melanina presentes en la fibra, además, esté ion transmite oxígeno y ataca los enlaces disulfuro de la fibra, permitiendo que de ese ataque se dé la ruptura de los enlaces S-S, con ello generando un color blanco en las fibras que se traten con una concentración de peróxido de hidrógeno.

Cada una de estas normas poseen similitudes en las fórmulas que se emplean para el cálculo del índice de blancura de la fibra, considerando que cada una de estas normas están relacionadas entre sí, de hecho, en la norma ASTM E313-20, se menciona que debe en parte el desarrollo de esta para el desarrollo de la formula como tal (ASTM, 2005). Además, la norma AATCC se rige más en parte a los parámetros que dictan ambas normas. Por tanto, el hecho que las frecuencias ultrasónicas en parte mejoraron la fijación de los iones de cada compuesto que generan el blanqueamiento de las fibras.

4.1.2 Análisis de Grasa en las fibras

El contenido de grasa que posee la fibra de alpaca tiende a ser mínimo considerando que de acuerdo con varios estudios la mayoría de datos sobre la fibra de alpaca Huacaya, arrojan datos numéricos que rondan un estima de 1 – 3% de contenido de grasa en la fibra como tal (Liu, Wang, & Wang, 2002). Sin embargo, en alpaca Suri no se tiene un estimado real de la grasa en su composición en sí, pero en estudios realizados se muestra que el rendimiento de la fibra limpia tras el desengrasado suele ser más elevada que el que se tiene en la fibra de oveja, lo cual refleja que se tiene una proporción baja de grasa y otras materias extrañas (Lupton, McColl, & Stobart, 2006). Es por ello que tomando el caso de la fibra de oveja la cual tiene un porcentaje más alto de grasa en la composición de la fibra, a causa de que, de acuerdo a estudios la grasa que se encuentra presente en esta fibra esta entre un rango que va de 5 – 25% (Ghimiş et al., 2023). Con esto se afirma que la fibra de alpaca tiende a ser más propensa a los daños en los tratamientos fisicoquímicos y se debe tener un especial cuidado al momento de realizar algún tratamiento, tomando como ejemplo la resistencia alcalina, no obstante, siguen teniendo una relación entre si las fibras de alpaca y oveja además que el mecanismo químico de degradación proteica va a ser el mismo en ambos casos (Aluigi et al., 2014).

Tabla 7
Análisis de grasa en muestras sucias y desengrasadas

MUESTRA	% GRASA
SIN TRATAR	7,99 ± 1,10 ^a
DES. CV	5,55 ± 0,66 ^b
DES. ULT	3,48 ± 0,28 ^c

Análisis

Al realizar las pruebas correspondientes por triplicado en muestras de lana sucia, lana desengrasada por el método convencional y lana desengrasada por ultrasonido, se denoto que en la muestra de fibra **SIN TRATAR** tuvo un porcentaje de 8% , el cual fue el más elevado referente al contenido de grasa, esto se debe a que al no ser tratada la fibra en sí, todavía se encuentra en su estructura el compuesto graso (Lupton, McColl, & Stobart, 2006). Sin embargo, el valor no es alto en comparación a otras fibras animales, tomando el caso de la fibra de oveja, la cual se caracteriza por tener un aproximado de 5 y 25% de grasa en la composición de la fibra como tal (Ghimiş et al., 2023).

Al realizar las pruebas correspondientes por triplicado en muestras de lana sucia, lana desengrasada por el método convencional y lana desengrasada por ultrasonido, se denotó que en la muestra de fibra **SIN TRATAR** tuvo un porcentaje de 8%, el cual fue el más elevado referente al contenido de grasa. La fibra del desengrasado por el método convencional (**DES. CV**) se determinó que al realizar el proceso de desengrasado aplicando el agente desengrasador, la fibra todavía posee una cierta cantidad de grasa, específicamente un 5% de grasa en la estructura de la fibra que posteriormente se empleó para procesos posteriores.

Por el contrario, el resultado obtenido con la fibra del desengrasado por el método asistido por ultrasonido (**DES. ULT**), que fue exactamente de 3% en contenido de grasa, se determinó que en dichas muestras tratadas se produjo una diferencia notable, dado que, al aplicarse las frecuencias ultrasónicas las muestras tendieron a arrojar resultados mejores que con el método convencional.

Al revisar cada una de las muestras se constató que, entre sí no tuvieron relación gracias a que cada muestra analizada tuvo un índice distinto, lo cual indicó que están en rangos muy distintos tanto la muestra sin tratar y las muestras desengrasadas por distintos métodos.

Discusión

El elevado porcentaje de grasa en la fibra **SIN TRATAR** se debe a que, al no ser tratada la fibra en sí, todavía se encuentra en su estructura el compuesto graso (Lupton, McColl, & Stobart, 2006). Sin embargo, el valor no fue alto en comparación a otras fibras animales, tomando el caso de la fibra de oveja, la cual se caracteriza por tener un aproximado de 5 y 25% de grasa en la composición de la fibra como tal (Ghimiş et al., 2023).

El que la fibra desengrasada convencionalmente conserve 5% de grasa se debe a que el proceso convencional de desengrasado no descompone químicamente ni elimina por completo la grasa que está unida a la estructura de la fibra (Afşar & Çetinkaya, 2008).

La diferencia notable en el desengrasado asistido por ultrasonido se debe a que la fibra se benefició de la cavitación ultrasónica que generó mayor eficiencia en el proceso de desengrasado, ya que, al aplicar las frecuencias ultrasónicas que generan la cavitación de reacciones químicas favorecieron a una mejor eliminación de suciedad y grasas presentes en la fibra (Mason, 2003).

Se determinó que las muestras de fibra de alpaca en sí no poseen una cantidad considerable de grasa que posee la fibra en su estructura (Lupton, McColl, & Stobart, 2006). No obstante, al aplicarse distintos métodos de desengrasado la que más efectiva resultó para eliminar la grasa en la fibra fue la muestra que se aplicó el desengrasado por el método asistido por ultrasonido, puesto que, tuvo una mejor eficiencia al momento de eliminar la grasa y suciedad presente en la fibra, por medio de la cavitación de reacciones químicas que otorga las frecuencias ultrasónicas (Mason, 2003).

4.1.3 Resistencia alcalina en muestras sin tratar y blanqueadas

La solubilidad alcalina es uno de los análisis más empleados para determinar la alteración química a la que han sido sometidas fibras queratínicas, en vista de que indica, por un lado, la desnaturización de la proteína, pero también por otro, la ruptura de enlaces estructurales (por ejemplo, los puentes disulfuro) que permiten la integridad de la fibra (Yamauchi et al., 1996). No obstante, el uso de la fibra de alpaca presentada en este trabajo era altamente dependiente de los tratamientos que le fueron aplicados previamente: por ejemplo, el desengrasado de la fibra elimina lípidos, que se encuentran como contaminantes del vellón, y realiza modificaciones sobre la accesibilidad de los reactivos químicos en la queratina (Allafi et al., 2020). Por otro lado, el blanqueamiento oxidativo realizado con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) puede estar causando oxidación de los enlaces disulfuro y afectando la resistencia frente a un ataque químico en la fibra de alpaca (Liu et al., 2004). También se ha comprobado que añadir borohidruro de sodio ($NaBH_4$) a la mezcla de blanqueamiento puede provocar efectos reductores que pueden mitigar los efectos dañinos de la oxidación, al menos en parte, manteniendo la estructura proteica frente a posteriores ataques alcalinos (Çiçekler & Tutuş, 2023). Partiendo de este punto en la **tabla 8** se reflejan los datos obtenidos al realizar la prueba de resistencia alcalina en muestras de fibra de alpaca sin tratar y blanqueadas con distintos agentes de blanqueamiento químicos, y distinta concentración, esto se llevó a cabo con el objetivo de analizar la alteración que tiene las fibras al aplicarse la solución de $NaOH$ para constar la pérdida de peso que tuvieron cada una de las muestras por triplicado.

Tabla 8
Resistencia alcalina por cada tratamiento

TRATAMIENTO	ALCALINIDAD (%)
SIN TRATAR	$14,27 \pm 0,46^m$
DES. CV	$7,61 \pm 0,10^f$
DES. ULT	$5,04 \pm 0,09^d$
P6% CV	$6,16 \pm 0,31^{ef}$
P3% CV	$4,47 \pm 0,66^{cd}$
B0,25% CV	$3,77 \pm 0,15^{bc}$
B0,15% CV	$3,74 \pm 0,22^{bc}$
P6% ULT	$2,68 \pm 0,65^a$
P3% ULT	$2,19 \pm 1,01^a$

B0,25% ULT	$2,99 \pm 1,02^{ab}$
B0,15% ULT	$2,25 \pm 0,40^a$

Nota: DES. – desengrasado, CV-convencional; ULT-ultrasónico; P-peróxido de hidrogeno en distintas concentraciones; B-borohidruro de sodio en distintas concentraciones; Valores referentes a la media ± desviación estándar; ^{a-b-c-d-e-f}: grupos estadísticos, ($P<0,05$).

Análisis

Al llevar a cabo el estadístico con los datos obtenidos de los análisis, se identifica que la solubilidad alcalina puede utilizarse como una señal del grado de resistencia de la fibra al ataque que puedan generar agentes químicos, ya sea para desengrasar o blanquear.

Se determinó que en la fibra **SIN TRATAR** de alpaca mostró el mayor resultado de resistencia alcalina en cuanto a los parámetros analizados siendo este muy superior con un valor de 14%, notándose que estuvo incluso fuera del rango de las demás muestras analizadas y con un índice distinto debido al encontrarse con un valor superior.

Tras el desengrasado por el método convencional (**DES. CV**) y por el método asistido por ultrasonido (**DES. ULT**), la solubilidad alcalina disminuyó de manera notable considerando que los valores obtenidos se encuentran en un estimado de 5 y 7%. Sin embargo, al realizar el análisis de estas muestras se presentó un punto de inflexión muy notorio en ambos casos, en vista que, la muestra de desengrasada por ultrasonido tiene un valor un poco menor a lo que presenta su contraparte del desengrasado por el método convencional.

En el caso de las fibras blanqueadas los datos que se obtuvieron fueron los siguientes, primero el caso de las muestras blanqueadas por el método convencional, donde se observó que en las muestras de peróxido de hidrógeno con una concentración de 6% y 3% (v/v) fueron distintas por motivo de que para el caso de la muestra de peróxido al 6% (**P6% CV**) por el método convencional tiene un valor muy similar al dato que se obtuvo de la muestra desengrasado convencional y del desengrasado ultrasonido (**DES. ULT**), considerando que el valor obtenido se encuentra en un rango de 6%, mientras que la muestra de peróxido de hidrógeno al 3% (**P3% CV**) (v/v) por el método convencional, generó un estimado de resistencia a álcalis de un valor de 4%.

Para el caso de las fibras blanqueada por el método convencional utilizando el borohidruro de sodio como agente de blanqueamiento los valores obtenidos, se hallaron en un punto medio, considerando que, sus valores estuvieron por debajo del caso de la muestra peróxido al 3% (**P3% CV**) por el método convencional (v/v), de donde al determinar dichos datos tanto en la muestra de borohidruro al 0,25% (**B0,25% CV**) por el método convencional (m/v) que fue de un estimado de 3%, como la muestra con diferente concentración de borohidruro al 0,15% (**B0,15% CV**) por el método convencional (m/v) se obtuvo un valor de 2%.

Las muestras del blanqueamiento por el método asistido por ultrasonido generaron valores muy por debajo de los anteriores mencionados en vista de que las muestras arrojaron resultados cercano a un valor de 2% en cada uno de los tratamientos de blanqueamiento del

ultrasonido, lo cual indicó que fueron los tratamientos que menos se degradaron del peso inicial al ser sometidos a un medio alcalino, además, que estas muestras se encuentran en un rango muy por debajo a las muestras convencionales, salvo por el caso de la muestra de borohidruro al 0,25% (**B0,25% ULT**) asistida por ultrasonido (m/v), debido a que esta fue la más próxima al tratamiento más bajo en el método convencional, sin embargo, es un dato que no está tan cercano a dicha muestra si no que está más cerca de las muestras más bajas.

Los resultados obtenidos establecieron que la resistencia alcalina en la fibra de alpaca se definió por el estado de la fibra y por el tratamiento utilizado.

Discusión

La solubilidad alcalina puede utilizarse como señal del grado de resistencia donde se genera la modificación de algunos de los aminoácidos presentes en la queratina (por ejemplo: la formación de la reactiva deshidroalanina que puede reaccionar con los residuos de lisina o cistina, dando lugar a productos entrecruzados tales como: la lisinoalanina y la lantionina (Yamauchi et al., 1996). Estos prerrequisitos explican el hecho que se dé la pérdida de peso en la fibra, del mismo modo, que por otros factores que no incluyen las propiedades físicas afectadas por el medio alcalino, sino que también existen reacciones químicas que podrían llegar a alterar la proteína o el denominado proceso de degradación.

Esta situación del elevado valor en la fibra **SIN TRATAR** podría justificarse porque esta fibra es rica en lípidos, suciedades, compuestos epidérmicos asociadas a la fibra no procesada, que se pueden degradar con facilidad en medio alcalino y que pueden aumentar el porcentaje de la pérdida de masa. Según Parlato & Porto (2020), las fibras animales crudas contienen hasta entre 26-28% de impurezas en su composición, lo cual coincide con la elevada pérdida encontrada en la muestra sin tratamiento. La eliminación de estas impurezas es esencial para obtener fibras de alta calidad, como también lo señala (Allafi et al., 2020).

La disminución de la solubilidad alcalina tras el desengrasado indica que la eliminación de grasas y contaminantes deja expuesta una queratina más resistente al ataque químico. De acuerdo con Pan, Hurren, & Li (2018), mencionan que este proceso influye de forma directa en las propiedades de la fibra, gracias a que el uso de agentes alcalinos como el carbonato de sodio facilita la saponificación y eliminación de grasas, reduciendo componentes que fácilmente se diluyen y estabilizando la estructura proteica principal. Esto explica los valores menores en comparación con la fibra sin tratar.

A través de la comparación por la proximidad de valores de ambas muestras de peróxido, están alineadas a los datos generados en ambos casos del desengrasado, lo cual indica que estuvieron en un rango de valor medio alto, esto sugirió que estos tratamientos en específicos generaron productos parcialmente solubles en un medio alcalino, no obstante, no se llega a degradar a tal punto como se redujo el peso en la muestra de fibra cruda. Tal como mencionan los autores Cardamone et al. (2009), donde se describe que al tratar fibras sometidas a un blanqueamiento con peróxido de hidrógeno en un medio alcalino estas no se disuelven del todo, puesto que algunos componentes de la queratina de la fibra como (cutícula, córtex) solo se fraccionaban, dando como resultado una recuperación a la

solubilidad en álcalis del 68 y 82% de la fibra expuesta al tratamiento alcalino, lo cual está acorde con los datos generados.

Los valores obtenidos con borohidruro dan a entender que el uso del borohidruro de sodio como agente de blanqueamiento controla que se dé una oxidación excesiva que normalmente se incrementa al tratarlo en un medio alcalino como menciona (Chilakamarry et al., 2021)

De acuerdo con Qian et al. (2023), el ultrasonido produce un efecto de cavitación que no solo ayuda a que el agente químico penetre, sino que además disminuye la degradación proteica al impedir que la fibra esté expuesta por mucho tiempo a condiciones alcalinas. Esto se corresponde con los valores más bajos desde el punto de vista estadístico en comparación con los tratamientos tradicionales.

La fibra sin tratar fue la más afectada a la reducción de su peso inicial, esto debido a que en su composición estuvieron presentes la mayor cantidad de impurezas, entre ellas se destacó la presencia de la grasa que fue uno de los factores cruciales con el objetivo que se viera más afectada al contacto con un medio alcalino, mientras que en las muestras desengrasadas no se redujeron significativamente porque al eliminarse la suciedad y la grasa de la composición de la fibra estas tendieron a ser un poco más resistentes al medio alcalino.

Por otro lado, los tratamientos blanqueados por el método convencional tanto con borohidruro y peróxido presentaron valores entre medio altos e intermedios, evidenciando una solubilidad parcial asociada a la modificación controlada de la queratina. Por último, en el caso de las muestras blanqueadas por el método ultrasónico, fueron las más resistentes al degradarse nulalemente en el medio alcalino, afirmando que la cavitación ultrasónica potencia la acción química sin incrementar la degradación proteica. Con esto, se determinó que el ultrasonido representa una alternativa tecnológica muy eficiente para mejorar significativamente la estabilidad de las fibras de alpaca obteniendo materiales de mayor calidad y durabilidad.

4.2 Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas en fibras blanqueadas y teñidas mediante métodos convencional y ultrasónico

La evaluación de las propiedades físico-mecánicas en materiales fibrilares es importante para determinar su aplicación final. Entre los principales parámetros evaluados están: fuerza de ruptura, máximo desplazamiento, máximo esfuerzo, máxima deformación y módulo de elasticidad. La fuerza de ruptura es la carga máxima que soporta una fibra antes de romperse, y está asociada con la resistencia a la tensión y durabilidad del material. El máximo desplazamiento hace referencia al alargamiento relativo máximo que alcanza la fibra antes de romperse. Este parámetro, generalmente se expresa en (%), y refleja la plasticidad y capacidad de estiramiento (Czyż et al., 2024). El máximo esfuerzo es aquel esfuerzo que soporta una fibra antes de desgarrarse, la cual indica resistencia intrínseca. La máxima deformación es el cambio relativo máximo de longitud respecto a la longitud bajo tracción antes de desgarrarse (Jankowska et al., 2019). El módulo de elasticidad indica la pendiente de la curva esfuerzo-deformación de la parte elástica de la fibra, y se asocia con la rigidez que posee la fibra (McGregor, 2012).

La fibra de alpaca Suri presenta propiedades físico-mecánicas que la hacen competitiva frente a otras fibras naturales. De acuerdo con Jankowska et al. (2019), en su estudio se menciona valores aproximados de fuerza de ruptura donde se estableció que en muestras de hilo de alpaca la fuerza que llegó a soportar fue de 30,36 N. Mientras que el módulo de elasticidad que alcanzó la fibra fue de 340 MPa, a su vez, la máxima deformación que obtuvieron fue de un aproximado de 40% en fibra suelta y 33% hilo de alpaca. Por su parte el estudio de Czyż et al. (2024), también reportan valores de la máxima deformación de la fibra que se encuentra aproximadamente entre 43 y 54 %, en muestras de fibras de alpaca de distinto color de pelaje, además, que se obtuvieron datos referentes al módulo de elasticidad, donde los valores aproximados entre fibras de distinto color se encuentran en un rango de 180 y 200 MPa. Los valores aportados en estas investigaciones pueden ser tomados en cuenta como referencia para revisar el efecto de las propiedades físico-mecánicas en las fibras de la alpaca Suri, que fueron empleados para realizar las muestras. En la **tabla 9** se indican los valores comparativos entre el punto de control (las muestras en etapas previas) frente a las muestras sometidas a los procesos de blanqueamiento.

Tabla 9

Propiedades físico-mecánicas en fibras sin tratar y blanqueadas

Parámetro / Tratamiento	Fuerza de ruptura (N)	Máximo desplazamiento (mm)	Máximo Esfuerzo (Cn/tex)	Máxima deformación (%)	Módulo de elasticidad (MPa)
FIBRA ORIGINAL					
SIN TRATAR	30,41 ± 0,49	9,88 ± 1,15	45,4 ± 36,75	47,31 ± 1,98	342,74 ± 22,07
FIBRA TRATADA					
BLANQUEADA					
DES CV	29,12 ± 1,81 ^a	7,52 ± 0,96 ^a	38,49 ± 7,64 ^a	37,40 ± 1,97 ^a	263,62 ± 29,42 ^a
P6% CV	28,48 ± 1,03 ^b	6,87 ± 0,95 ^b	34,87 ± 3,69 ^e	30,85 ± 2,22 ^h	190,20 ± 16,60 ^b
P3% CV	28,39 ± 1,68 ^b	7,17 ± 0,96 ^a	35,83 ± 9,06 ^d	35,34 ± 1,80 ^c	139,07 ± 20,47 ^f
B0,25% CV	27,37 ± 1,38 ^c	5,43 ± 0,87 ^c	31,27 ± 5,80 ⁱ	30,03 ± 1,69 ^h	163,08 ± 17,87 ^c
B0,15% CV	26,39 ± 1,13 ^d	6,84 ± 0,83 ^b	34,99 ± 10,57 ^d	33,54 ± 1,56 ^d	152,93 ± 17,50 ^d
DES UTL	29,82 ± 0,95 ^z	7,49 ± 0,53 ^x	40,31 ± 2,51 ^z	38,47 ± 2,06 ^z	310,81 ± 17,16 ^z
P6% ULT	29,70 ± 1,54 ^z	6,01 ± 0,99 ^y	39,32 ± 8,27 ^x	35,78 ± 2,10 ^w	212,26 ± 6,64 ^x
P3% ULT	29,36 ± 1,02 ^z	7,35 ± 0,77 ^x	39,67 ± 7,35 ^x	36,03 ± 1,24 ^y	202,21 ± 14,45 ^x
B0,25% ULT	28,95 ± 2,24 ^x	8,23 ± 0,79 ^z	38,84 ± 6,98 ^y	37,42 ± 1,13 ^x	182,01 ± 4,99 ^y
B0,15% ULT	28,41 ± 1,35 ^x	6,88 ± 0,77 ^y	37,21 ± 6,81 ^w	35,16 ± 1,04 ^w	178,09 ± 1,97 ^z

Nota: DES. – desengrasado, CV-convencional; UTL-ultrásónico; P-peróxido de hidrógeno en distintas concentraciones; B-borohidruro de sodio en distintas concentraciones; Valores referentes a la media ± desviación estándar; ^{a-b-c-d-e-f}: grupos estadísticos de las muestras convencionales; ^{z-x-y-w-v-u}: grupos estadísticos de las muestras del ultrasonido, ($P<0,05$).

Análisis

Al comparar los valores que se obtuvieron en cada uno de los tratamientos en la fibra se determinó que las fibras de control tienden a estar por encima del resto, lo cual hace que sean los estándares de control para establecer la comparación entre cada uno de los

parámetros analizados de las propiedades físico-mecánicas en las muestras sometidas al proceso de blanqueamiento.

Fuerza de ruptura (N): En cuanto a la fuerza de ruptura, los datos referentes a los desengrasados tanto por el método convencional (**DES. CV**) como por el método de ultrasonido (**DES. ULT**), en estos casos se generó una leve disminución del valor original. Las muestras blanqueadas por el método convencional con peróxido al 6% y 3% (v/v), y con borohidruro al 0,25% y 0,15% (m/v), se establecieron en un rango de 26 y 28 N, teniendo en cuenta que con respecto al estándar de control que es la muestra desengrasada convencional (**DES. CV**) que tuvo un valor de 29,12, determinando que se generó una reducción en la carga máxima que puede soportar la fibra.

Por su parte las muestras blanqueadas por el método asistido por ultrasonido con peróxido al 6% y 3%, y con borohidruro al 0,25% y 0,15%, el rango en que estas se encuentran es de 28 y 29N estando muy cerca del estándar de control la muestra desengrasada por el método de ultrasonido (**DES. ULT**) el cual tuvo un valor de 29,82 N.

Máximo desplazamiento (mm): El máximo desplazamiento en las muestras desengrasadas por el método convencional (**DES.CV**) y ultrasonido (**DES.ULT**), se generó una reducción de valores. Las muestras de los tratamientos de blanqueamiento de peróxido al 6% y 3%, y con borohidruro al 0,25% y 0,15%, con el tratamiento convencional mostraron valores de máximo desplazamiento entre 5 y 7 mm, siendo cercano al valor de su respectivo desengrasado (**DES. CV**) el estándar de control, el que tuvo un valor de 7,52 mm.

No obstante, las muestras del ultrasonido se ven con una diferencia marcada puesto que el rango en el que estas se encuentra esta entre 6 y 7 mm encontrándose cercano a su valor control del desengrasado asistido por ultrasonido (**DES.ULT**), que obtuvo un valor de 7,49 mm.

Máximo esfuerzo (cN/tex): En el máximo esfuerzo dicho valor disminuye al realizarse el proceso de desengrasado por el método convencional (**DES. CV**) y asistido por ultrasonido (**DES. ULT**). Las muestras tratadas con el método convencional y utilizando agentes de blanqueamiento de peróxido al 6% y 3%, y de borohidruro al 0,25% y 0,15% (m/v) mostraron valores entre 31 y 35 (cN/tex), siendo el rango de valores más afectado comparando con su control (**DES. CV**), que obtuvo un valor de 38,49 cN/tex.

Por su parte los valores obtenidos en las muestras asistidas por ultrasonido y aplicados los agentes de blanqueamiento mostraron valores más altos con un rango entre 37 y 39 (cN/tex), estando cercano al estándar de control (**DES. ULT**) que tuvo un valor de 40,31 cN/tex.

Máxima deformación (%): La maxima deformación que se generó al aplicar el desengrasado en la fibra por los dos métodos, este valor disminuyó. Al analizar los datos de los tratamientos de blanqueamiento con peróxido al 6% y 3%, y de borohidruro al 0,25% y 0,15%, tanto en método del ultrasonido como el método convencional, se generan disminuciones.

El método convencional, los valores estuvieron entre el 30 y 35%, donde al comparar con su estándar de control (**DES. CV**), que obtuvo un valor de 37,4%, se verifica la reducción considerable en la máxima deformación que puede soportar la fibra, mientras que las muestras del ultrasonido presentaron valores en un rango de 35 y 37%, que al comparar con su estándar de control (**DES. ULT**), el cual presentó una máxima deformación de 38,47%, se encontraron dentro del rango que estableció su estándar.

Módulo de elasticidad (MPa): El módulo de elasticidad que tuvo el desengrasado de la fibra por el método convencional y el método asistido por ultrasonido disminuyó. El blanqueamiento de la fibra mediante el método convencional y utilizando peróxido al 6% y 3% y borohidruro al 0,25% y 0,15%, mostró valores del módulo de elasticidad entre 190 y 150 MPa, teniendo un cambio significativo considerable en vista de que su valor control del desengrasado (**DES. CV**), que obtuvo un valor de 263,42 MPa, verificando una disminución de la elasticidad de la fibra.

Por su parte las muestras del ultrasonido también presentaron una disminución del módulo de elasticidad, puesto que, los valores que mostró fueron de 178 y 212 MPa, que al comparar con su valor de control (**DES. ULT**), el cual mostró un valor en el módulo de elasticidad de 310 MPa, se verificó que hay una disminución considerable de elasticidad de la fibra.

Una vez analizadas las muestras blanqueadas, en la tabla 10 se ven reflejados los posteriores tratamientos de teñido en las fibras que previamente se blanquearon, comparando cada una de las muestras con su valor control (sus respectivas muestras desengrasadas).

Discusión

Fuerza de ruptura (N): Al basarse en los estudios previos de Jankowska et al. (2019), se pudo determinar en muestras de fibra de alpaca sin tratar, se obtienen valores cercanos a los 30 N. Este valor está muy acorde al que se obtuvo en las pruebas en la muestra **SIN TRATAR**.

La disminución en los desengrasados se debe a que al desengrasar se eliminan impurezas y grasas acumuladas en la fibra (Pan, Hurren, & Li, 2018). La reducción en las muestras convencionales se debe a que las condiciones a las que se expusieron en el baño maría donde la exposición prolongada a la temperatura elevada del baño maría que produjo la degradación de la fibra, que se da en gran parte a la escisión de cadenas mediante mecánicos de radicales libres de múltiples pasos (iniciación, propagación y terminación) y de la formación de productos oxidativos, generar un menor rendimiento mecánico en la fibra (Gupta et al., 2023).

Los mejores resultados del ultrasonido se deben a que el ultrasonido mediante las frecuencias ultrasónicas que emite hacia las muestras en sí hace que las reacciones cavitén de mejor manera en la fibra y se obtengan resultados favorables y sin perder parte de las propiedades físico-mecánicas originales que posee la fibra de alpaca (Li et al., 2022). Con ello se consideró que las muestras tratadas con método asistidos por ultrasonido favorecieron en gran medida a la preservación de las cargas máximas que puede soportar la fibra.

Máximo desplazamiento (mm): Se reflejó la misma tendencia del parámetro anterior, primero teniendo en cuenta los datos de la muestra sin tratar, obteniendo un valor alto debido a que la fibra está intacta. La reducción en desengrasados se debe al tratamiento de eliminar las impurezas y grasas presentes en la fibra (Pan, Hurren, & Li, 2018).

Las muestras del ultrasonido mejoraron en comparación a su contraparte de muestras convencionales, teniendo en cuenta que el ultrasonido favoreció a que las propiedades físico-mecánicas de la fibra de alpaca no se vean tan alteradas, por el proceso de cavitación que genera en los reactivos químicos, haciendo que se impregnen de mejor manera en la fibra (Li et al., 2022).

Máximo esfuerzo (cN/tex): En las fibras sin tratar, siempre se encuentra la tendencia de que la muestra tiene un valor elevado al resto por el hecho que la fibra se encuentra en un estado original con sus propiedades intactas. La disminución al desengrasarse se debe a que se elimina impurezas y grasas en la fibra, lo que genera la alteración en sus propiedades físico-mecánicas (Pan, Hurren, & Li, 2018).

Los valores más altos en ultrasonido se deben a que el ultrasonido sí tuvo una mejor influencia en el tratamiento de las fibras como tal por su aportación de cavitación de reacciones químicas mediante frecuencias ultrasónicas que ayudaron a mejorar los tratamientos en fibra de alpaca (Li et al., 2022).

Máxima deformación (%): La fibra sin tratar va a tender a tener el valor más alto debido a las sus condiciones de estar intacta la fibra. Además, este valor es similar al valor que obtuvieron, en el estudio Jankowska et al. (2019), con un rango de 40%, acorde a lo que menciona en su investigación.

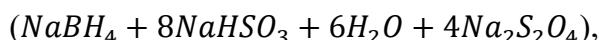
La disminución al desengrasarse se debe a la eliminación de las impurezas y grasas presentes en la fibra, por lo que, este cambio es normal y no genera un problema significativo (Pan, Hurren, & Li, 2018). Estos resultados demuestran que el proceso asistido por ultrasonido preservó las propiedades físico-mecánicas debido a la cavitación de reacciones químicas mediante frecuencias ultrasónicas que ayudaron a mejorar los tratamientos en fibra de alpaca, acorde a lo que estudió Li et al., (2022) en su investigación.

Módulo de elasticidad (MPa): De acuerdo con Jankowska et al. (2019), se menciona que el estimado promedio en el que se debe encontrar el valor de esta medición es un aproximado de 340 MPa. La muestra sin tratar mantuvo un valor cercano, ya que sus propiedades físico-mecánicas están intactas. La disminución al desengrasarse se debe a la eliminación de impurezas y grasas presentes en la fibra (Pan, Hurren, & Li, 2018).

En contraste varios de los cambios generados en cada uno de los parámetros de las propiedades físico-mecánicas de la fibra de alpaca se deben a varios factores, uno de ellos es cómo reacciona el peróxido de hidrógeno en las fibras a fin de que se genere el blanqueamiento. De acuerdo con Cardamone, Yao, & Nuñez (2004), con el objetivo que se genere el blanqueamiento se debe activar el ion perhidroxilo (HO_2^-) es el responsable que se genere el blanqueamiento oxidativo, el mecanismo de acción que este tiene conlleva a la oxidación y destrucción de pigmentos de melanina presentes en la fibra, además, este ion

transmite oxígeno y ataca los enlaces disulfuro de la fibra, permitiendo que de ese ataque se dé la ruptura de los enlaces S-S, con ello generando un color blanco en las fibras que se traten con una concentración de peróxido de hidrógeno.

Mientras que con la finalidad de que se genere el blanqueamiento con borohidruro de sodio se debe efectuar la reacción de reducción la cual consiste en (borohidruro de sodio + bisulfito de sodio + agua + ditionitio de sodio).



Esto menciona los autores Yilmazer & Kanik (2009), donde con esta reacción se genera un blanqueamiento similar al que se da en el peróxido de hidrógeno, además este compuesto genera la reducción de los enlaces disulfuro de la queratina liberando grupos (-SH), los responsables de generar la reacción y el posterior blanqueamiento. Además, de esto las reacciones químicas que se dan por el método convencional hicieron que los casos de las muestras convencionales estuvieran muy por debajo a las muestras ultrasónicas, las cuales se vieron favorecidas por la cavitación de las reacciones químicas mediante las frecuencias ultrasónicas, de acuerdo con la investigación de (Li et al., 2022).

Una vez analizadas las muestras blanqueadas, en la **tabla 10** se ven reflejados los posteriores tratamientos de teñido en las fibras que previamente se blanquearon, comparando cada una de las muestras con su punto de control (sus respectivas muestras desengrasadas).

Tabla 10
Propiedades físico-mecánicas en muestras teñidas

Parámetro / Tratamiento	Fuerza de ruptura (N)	Máximo desplazamiento (mm)	Máximo Esfuerzo (Cn/tex)	Máxima deformación (%)	Módulo de elasticidad (MPa)
FIBRA ORIGINAL					
SIN TRATAR	30,41 ± 0,49	9,88 ± 1,15	45,4 ± 36,75	47,31 ± 1,98	342,74 ± 22,07
FIBRA TRATADA					
TEÑIDA					
DES CV	29,12 ± 1,81 ^a	7,52 ± 0,96 ^b	38,49 ± 7,64 ^a	37,40 ± 1,97 ^a	263,62 ± 29,42 ^a
P6% CV	26,73 ± 1,07 ^c	8,30 ± 0,84 ^a	33,05 ± 6,33 ^e	30,08 ± 2,39 ^h	130,56 ± 13,43 ^d
P3% CV	26,52 ± 0,94 ^c	8,30 ± 0,69 ^a	33,54 ± 9,41 ^e	34,57 ± 1,31 ^d	118,92 ± 11,22 ^f
B0,25% CV	24,83 ± 0,63 ^d	6,99 ± 0,84 ^c	31,09 ± 7,31 ⁱ	30,14 ± 0,05 ^h	106,27 ± 12,38 ^h
B0,15% CV	24,70 ± 1,22 ^d	6,96 ± 0,87 ^c	34,61 ± 10,75 ^d	31,11 ± 1,72 ^g	109,64 ± 11,04 ^h
DES UTL	29,82 ± 0,95 ^z	7,49 ± 0,53 ^z	40,31 ± 2,51 ^z	38,47 ± 2,06 ^z	310,81 ± 17,16 ^z
P6% ULT	28,94 ± 0,92 ^x	7,51 ± 0,80 ^z	39,08 ± 10,06 ^x	32,74 ± 1,97 ^t	143,16 ± 2,89 ^y
P3% ULT	27,53 ± 0,98 ^y	7,66 ± 0,99 ^z	35,38 ± 8,80 ^u	33,78 ± 1,05 ^u	146,72 ± 7,66 ^y
B0,25% ULT	27,92 ± 0,89 ^{yx}	7,02 ± 0,89 ^z	37,71 ± 8,27 ^w	35,00 ± 1,17 ^w	130,37 ± 1,87 ^v
B0,15% ULT	26,77 ± 0,99 ^w	6,51 ± 0,99 ^x	35,74 ± 9,57 ^u	35,00 ± 1,16 ^w	127,60 ± 8,44 ^v

Nota: DES. – desengrasado, CV-convencional; ULT-ultrasonido; P-peróxido de hidrógeno en distintas concentraciones; B-borohidruro de sodio en distintas concentraciones; Valores referentes a la media ± desviación estándar; ^{a-b-c-d-e-f}: grupos estadísticos de las muestras convencionales; ^{z-x-y-w-v-u}: grupos estadísticos de las muestras del ultrasonido, ($P<0,05$).

Análisis

Al examinarse los valores obtenidos de las muestras teñidas, se observan muchos cambios en cada uno de los parámetros.

Fuerza de ruptura (N): La fuerza de ruptura en muestras tratadas por el método convencional se denotó una reducción de la fuerza de ruptura que puede soportar la fibra. El teñido de la fibra luego de someterse a los procesos de blanqueamiento con peróxido al 6% y 3%, y de borohidruro al 0,25% y 0,15% mostró valores entre 24 y 26 N, siendo este un valor bajo en comparación al estándar de control, la muestra desengrasada convencionalmente (DES.CV), debido a que, esta muestra presentó un valor de 29,10 N, en cuanto al soporte de la carga máxima de que puede soportar la fibra.

En el caso de las fibras teñidas luego de ser sometidos al blanqueamiento asistido por ultrasonido y blanqueadas con peróxido al 6% y 3% (v/v), y de borohidruro al 0,25% y 0,15% (m/v), sucede un caso similar, sin embargo, con la diferencia que el rango de la fuerza de ruptura fue menor (26 y 28 N), estos al compararlos con valor control de su muestra desengrasada (DES.ULT), que tuvo un valor de 29,82 N, se determinó que la fibra se mantuvo con algo de resistencia a la carga máxima a la ruptura.

Máximo desplazamiento (mm): El desplazamiento máximo de las muestras teñidas luego de ser tratadas convencionalmente y blanqueadas con peróxido al 6% y 3% (v/v), y de borohidruro al 0,25% y 0,15% (m/v) mostraron valores mayores que la muestra control (DES.CV) estando estos en un rango de 6 y 8 mm. Mientras que las muestras tratadas por ultrasonido y blanqueadas mantuvieron valores de 6 y 7 mm, siendo muy cercanas a su muestra control (DES.ULT).

Máximo esfuerzo (cN/tex): En máximo esfuerzo se observó que el tratamiento convencional, del blanqueamiento con peróxido al 6% y 3% (v/v), y de borohidruro al 0,25% y 0,15% (m/v) y posterior teñido arrojó valores entre 31 y 34 cN/tex, siendo menores al de su muestra control (DES.CV).

Por el contrario, las muestras tratadas con ultrasonido y blanqueadas con peróxido al 6% y 3% (v/v), y de borohidruro al 0,25% y 0,15% (m/v), produjo que el proceso del teñido en las fibras arroje datos que se encuentran en un rango de 35 y 39 cN/tex. Estos valores fueron mayores a los que se obtuvo con el tratamiento convencional.

Máxima deformación (%): La maxima deformación de las muestras del tratamiento convencional y blanqueados con peróxido al 6% y 3% (v/v), y de borohidruro al 0,25% y 0,15% (m/v) fueron teñidas y mostraron valores en un rango de 30 y 34%, valor que estuvo por debajo de su muestra control (DES.CV).

Por su parte, las muestras tratadas por ultrasonido, blanqueadas con peróxido al 6% y 3% (v/v), y de borohidruro al 0,25% y 0,15% (m/v) y posteriormente teñidas, mostraron valores en un rango más acotado de 32 y 35% y menores que su estándar control (DES.ULT).

Módulo de elasticidad (MPa): El módulo de elasticidad de las muestras del tratamiento convencional y blanqueadas con peróxido al 6% y 3% (v/v), y de borohidruro al

0,25% y 0,15% (m/v) favorecieron que el teñido arroje valores entre 100 y 130 MPa, siendo menores que su control (DES.CV).

Las muestras tratadas con ultrasonido previamente blanqueadas con peróxido al 6% y 3% (v/v), y de borohidruro al 0,25% y 0,15% (m/v) y consecutivamente teñidas, también sufrieron una ligera disminución obteniendo valores que se encuentran en un rango de 127 y 130 MPa.

Discusión

Los cambios en cada uno de los parámetros se deben en parte a que las muestras en el proceso de teñido deben someterse a altas temperaturas para que el tinte se fije en la fibra, como mencionan Pei et al. (2019), donde para realizar el teñido de fibras es necesario aplicar temperaturas que oscilan los 80 y 90 °C, dado que, el tinte para fijarse de mejor manera en la fibra requiere de temperaturas altas o si no se generan teñidos irregulares en la fibra.

Es por ello que, al aplicar las temperaturas elevadas en el proceso de teñido, las propiedades físico-mecánicas de la fibra tienden a disminuir, además, que la estructura morfológica de la fibra se ve alterada alterando las cargas referentes a cada uno de los parámetros de las propiedades físico-mecánicas (Niloy Rahaman et al., 2019).

Fuerza de ruptura (N): De acuerdo con Jankowska et al. (2019), la fuerza de ruptura (N), debe tener un valor de alrededor de 30 N. La reducción en las muestras convencionales ocurrió porque las muestras en el proceso de teñido se expusieron a temperaturas altas (80 y 90 °C) que modificaron sus propiedades físico-mecánicas.

El mejor comportamiento de las muestras con ultrasonido se debe en parte a que los procesos asistidos por ultrasonido al efectuar la cavitación por medio de frecuencia ultrasónicas de los reactivos químicos, ya sea, para blanquear como para teñir se genera que las propiedades físico-mecánicas se conserve en cierta medida (Li et al., 2022).

Máximo desplazamiento (mm): Los valores mayores en las muestras convencionales ocurrieron porque al momento de teñirse la fibra requiere del hinchamiento de la fibra para que el tinte se fije de mejor manera y con ello en ocasiones el diámetro de la fibra aumente, como mencionan (Ketema & Worku, 2020). En el caso de las muestras con ultrasonido, las fibras no requirieron mucho hinchamiento de la fibra a fin de que el tinte se fije mejor en la muestra.

Máximo esfuerzo (cN/tex): El hecho de que las muestras con ultrasonido obtuvieron valores mayores se debe a las condiciones que aporta el ultrasonido, por la cavitación por medio de las frecuencias ultrasónicas, que hacen que la fibra conserve sus propiedades físico-mecánicas intactas en cierta medida (Li et al., 2022).

Máxima deformación (%): La fibra sin tratar va a tender a tener el valor más alto debido a las sus condiciones de estar intacta la fibra. Además, este valor es similar al valor que obtuvieron, en el estudio Jankowska et al. (2019), con un rango de 40%, acorde a lo que menciona en su investigación.

Aunque ambos casos se vieron afectados en este parámetro, considerando que, la exposición a la altas temperatura (80 y 90°C) que se requiere para el proceso de teñido, hizo que alteraran los valores de este parámetro de las propiedades físico-mecánicas (Niloy Rahaman et al., 2019).

Módulo de elasticidad (MPa): De acuerdo con Jankowska et al. (2019), se menciona que el estimado promedio en el que se debe encontrar el valor de esta medición es un aproximado de 340 MPa. Los bajos valores en las muestras convencionales se deben a que las muestras sufrieron un gran desgaste en el proceso de teñido como menciona (Niloy Rahaman et al., 2019).

La ligera disminución en las muestras con ultrasonido se debe a que las condiciones del proceso de teñido, donde se requiere de temperatura altas (80 y 90°C), son necesarias para que la fibra absorba el tinte (Niloy Rahaman et al., 2019).

Una vez analizada las muestras teñidas por el método convencional y ultrasónico, en la **tabla 11** se examina los cambios que sufren las fibras al pasar del proceso de blanqueamiento al teñido de las fibras con los distintos tratamientos, y con ello ver cuan afectados resultaron las fibras en cada uno de los parámetros de las propiedades fisico-mecánicas.

Tabla 11*Comparación de los tratamientos blanqueados y posteriormente teñidas*

Parámetro / Tratamiento	Fuerza de ruptura (N)	Máximo desplazamiento (mm)	Máximo Esfuerzo (Cn/tex)	Máxima deformación (%)	Módulo de elasticidad (MPa)					
MUESTRAS TRATADAS EN ESTAPA FINAL										
	BLANQUEADA	TEÑIDA	BLANQUEADA	TEÑIDA	BLANQUEADA	TEÑIDA	BLANQUEADA	TEÑIDA	BLANQUEADA	TEÑIDA
P6% CV	28,48 ± 1,03 ^{ay}	26,73 ± 1,07 ^{bx}	6,87 ± 0,95 ^{ax}	8,30 ± 0,84 ^{bz}	34,87 ± 3,69 ^{av}	33,05 ± 6,33 ^{av}	30,85 ± 2,22 ^{as}	30,08 ± 2,39 ^{bv}	190,20 ± 16,60 ^{ay}	130,56 ± 13,43 ^{bz}
P3% CV	28,39 ± 1,68 ^{ay}	26,52 ± 0,94 ^{bx}	7,17 ± 0,96 ^{ay}	8,30 ± 0,69 ^{bz}	35,83 ± 9,06 ^{aw}	33,54 ± 9,41 ^{av}	35,34 ± 1,80 ^{ax}	34,57 ± 1,31 ^{bz}	139,07 ± 20,47 ^{aq}	118,92 ± 11,22 ^{bx}
B0,25% CV	27,37 ± 1,38 ^{ax}	24,83 ± 0,63 ^{bw}	5,43 ± 0,87 ^{aw}	6,99 ± 0,84 ^{bx}	31,27 ± 5,80 ^{ar}	31,09 ± 7,31 ^{ar}	30,03 ± 1,69 ^{as}	30,14 ± 0,05 ^{av}	163,08 ± 17,87 ^{au}	106,27 ± 12,38 ^{bv}
B0,15% CV	26,39 ± 1,13 ^{aw}	24,70 ± 1,22 ^{bw}	6,84 ± 0,83 ^{ax}	6,96 ± 0,87 ^{ax}	34,99 ± 10,57 ^{aw}	34,61 ± 10,75 ^{aw}	33,54 ± 1,56 ^{aw}	31,11 ± 1,72 ^{bv}	152,93 ± 17,50 ^{as}	109,64 ± 11,04 ^{bz}
P6% ULT	29,70 ± 1,54 ^{az}	28,94 ± 0,92 ^{az}	6,01 ± 0,99 ^{ax}	7,51 ± 0,80 ^{bz}	39,32 ± 8,27 ^{az}	39,08 ± 10,06 ^{az}	35,78 ± 2,10 ^{ax}	32,74 ± 1,97 ^{bx}	212,26 ± 6,64 ^{az}	143,16 ± 2,89 ^{bz}
P3% ULT	29,36 ± 1,02 ^{az}	27,53 ± 0,98 ^{bz}	7,35 ± 0,77 ^{ay}	7,66 ± 0,99 ^{ay}	39,67 ± 7,35 ^{az}	35,38 ± 8,80 ^{bx}	36,03 ± 1,24 ^{ay}	33,78 ± 1,05 ^{bw}	202,21 ± 14,45 ^{az}	146,72 ± 7,66 ^{bz}
B0,25% ULT	28,95 ± 2,24 ^{ay}	27,92 ± 0,89 ^{bz}	8,23 ± 0,79 ^{az}	7,02 ± 0,89 ^{bz}	38,84 ± 6,98 ^{ay}	37,71 ± 8,27 ^{ay}	37,42 ± 1,13 ^{az}	35,00 ± 1,17 ^{bz}	182,01 ± 4,99 ^{ax}	130,37 ± 1,87 ^{bz}
B0,15% ULT	28,41 ± 1,35 ^{ay}	26,77 ± 0,99 ^{bx}	6,88 ± 0,77 ^{ax}	6,51 ± 0,99 ^{ax}	37,21 ± 6,81 ^{ax}	35,74 ± 9,57 ^{ax}	35,16 ± 1,04 ^{ax}	35,00 ± 1,16 ^{az}	178,09 ± 1,97 ^{ax}	127,60 ± 8,44 ^{bz}

Nota: DES. – desengrasado, CV-convencional; ULT-ultrasónico; P-peróxido de hidrogeno en distintas concentraciones; B-borohidruro de sodio en distintas concentraciones; Valores referentes a la media ± desviación estándar; ^{z_x_y_w_v_r_u_t_s_r}: grupos estadísticos por columnas; ^{a-b}: grupos estadísticos entre tratamientos blanqueados y teñidos, ($P<0,05$)

Análisis

Al analizar los datos obtenidos tanto en las muestras blanqueadas como en las muestras posteriormente teñidas, se analizó los cambios que estos sufrieron entre procesos, teniendo en cuenta que las muestras de teñido van a estar con valores menores al proceso previo de blanqueamiento de cada una de las muestras.

La comparación entre las muestras blanqueadas y teñidas evidenciaron que, la fuerza de ruptura, el máximo desplazamiento, el máximo esfuerzo, la máxima deformación y el módulo de elasticidad son afectados.

De forma general se pudo observar que el blanqueamiento con peróxido al 6% y 3% (v/v) y el posterior teñido de la fibra por el método asistido por ultrasonido, obtuvieron valores que se encuentran en rangos por cada uno de los parámetros de: fuerza de ruptura en blanqueamiento de (29N) y en teñido de (27 y 28 N); máximo desplazamiento en blanqueamiento de (6 y 7 mm) y en teñido de (7 mm); máximo esfuerzo en blanqueamiento de (39 cN/tex) y en teñido (35 y 39 cN/tex); máxima deformación en blanqueamiento (35 y 36 %) y en teñido (32 y 33 %); y módulo de elasticidad en blanqueamiento de (200 y 210 MPa) y en teñido (140 MPa).

Las muestras con borohidruro al 0,25% y 0,15% (m/v) por ultrasonido, también mostraron excelentes resultados, tomando en cuenta que los valores de las propiedades físico-mecánicas de la fibra originales, estuvieron cercanos a su control, los valores que obtuvieron de los parámetros fueron de: fuerza de ruptura en blanqueamiento de (28 N) y en teñido de (26 y 27 N); máximo desplazamiento en blanqueamiento de (6 y 8 mm) y en teñido de (6 y 7 mm); máximo esfuerzo en blanqueamiento de (37 y 38 cN/tex) y en teñido (35 y 37 cN/tex); máxima deformación en blanqueamiento (35 y 37 %) y en teñido (35%); y módulo de elasticidad en blanqueamiento de (180 MPa) y en teñido (130 MPa).

Las muestras tratadas convencionalmente que se blanquearon con peróxido al 6% y 3% (v/v) y que seguidamente se tiñeron, obtuvieron valores en los parámetros de: fuerza de ruptura en blanqueamiento de (28 N) y en teñido de (26 N); máximo desplazamiento en blanqueamiento de (6 y 7 mm) y en teñido de (8 mm); máximo esfuerzo en blanqueamiento de (34 y 35 cN/tex) y en teñido (33 cN/tex); máxima deformación en blanqueamiento (30 y 35 %) y en teñido (30 y 34 %); y módulo de elasticidad en blanqueamiento de (130 y 190 MPa) y en teñido (130 y 110 MPa).

A su vez, las muestras tratadas convencionalmente que se blanquearon con borohidruro al 0,25% y 0,15% (m/v) y que consecutivamente se tiñeron, obtuvieron valores en los parámetros de: fuerza de ruptura en blanqueamiento de (26 y 27 N) y en teñido de (24 N); máximo desplazamiento en blanqueamiento de (5 y 6 mm) y en teñido de (6 mm); máximo esfuerzo en blanqueamiento de (32 y 34 cN/tex) y en teñido (32 y 34 cN/tex); máxima deformación en blanqueamiento (30 y 33 %) y en teñido (30 y 31 %); y módulo de elasticidad en blanqueamiento de (150 y 160 MPa) y en teñido (100 MPa).

Discusión

Los valores menores en las muestras de teñido con respecto al blanqueamiento se deben en parte a que en cada uno de los casos el proceso de teñido aplica temperaturas altas que se requieren para teñir la fibra, siendo estas temperaturas necesarias para que suceda el proceso de teñido (Niloy Rahaman et al., 2019)..

El blanqueamiento con peróxido asistido por ultrasonido determinó que se mantuvo de mejor forma a la fibra al aplicar el ultrasonido en el procesamiento. Al comparar ambos procesos se determinó que, la cavitación de las reacciones químicas mediante las frecuencias ultrasónicas en la fibra produjo un menor daño en la fibra (Li et al., 2022).

En las muestras con borohidruro asistido por ultrasonido, en ambos casos del procesamiento de la fibra como el blanqueamiento y el posterior teñido se verificó que, la cavitación de las reacciones químicas mediante las frecuencias ultrasónicas en la fibra produjo un menor daño en la fibra (Li et al., 2022).

Se evidenció que las muestras convencionales correspondientes a los tratamientos de peróxido tuvieron alteraciones en las propiedades físico-mecánicas, en comparación a las muestras del ultrasonido que se mantuvieron estables.

Se comprobó que las muestras convencionales correspondientes a los tratamientos de borohidruro obtuvieron las mayores alteraciones en las propiedades físico-mecánicas, en comparación a las muestras del ultrasonido que se mantuvieron estables.

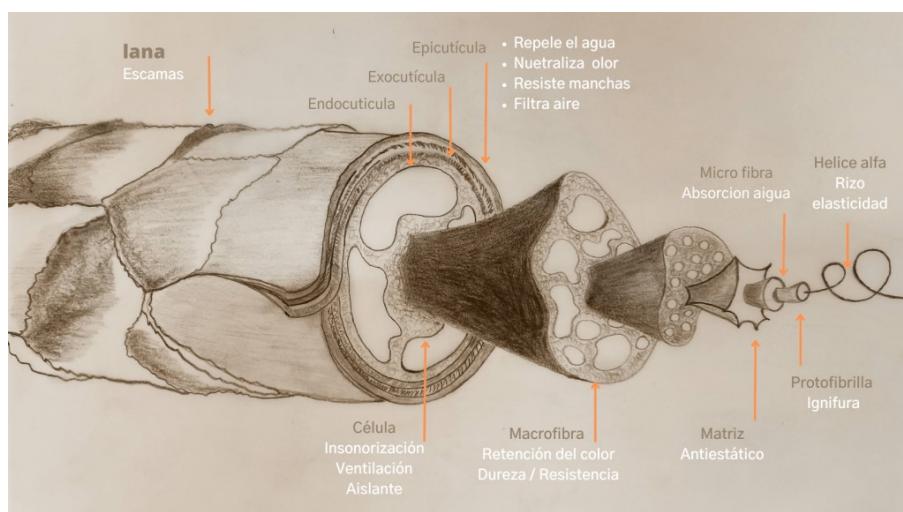
En el caso del tratamiento convencional, al haber analizado los valores obtenidos de las propiedades físico-mecánicas se comprobó que, las muestras tuvieron alteraciones considerables en los valores de los parámetros de las propiedades físico-mecánicas, tomando en cuenta que las reacciones químicas generaron un desgaste en la estructura de la fibra. La exposición prolongada a la temperatura elevada del baño maría generó escisión de cadenas mediante mecanismos de radicales libres de múltiples pasos (iniciación, propagación y terminación) y de la formación de productos oxidativos, generar un menor rendimiento mecánico en la fibra (Gupta et al., 2023).

4.3 Evaluación mediante (SEM) de cambios morfológicos en las fibras blanqueadas y teñidas por métodos convencional y ultrasónico

La microscopía electrónica de barrido (SEM) indica las superficies longitudinales lisas con escamas más delgadas y densas en comparación que se presentan en la fibra de alpaca. La fibra de alpaca se constituyen por capas y estructuras morfológicas, donde en el exterior de estas se encuentra la cutícula, que se compone de células en formas de escamas, debajo de la cutícula se encuentran la exocutícula y la endocutícula; la primera está formada por enlaces disulfuro (-S-S) los cuales otorgan la resistencia química, la endocutícula posee azufre y enlaces iónicos e hidrógeno, que la hacen susceptible a la hidrolisis y a la acción de agentes químicos, ya sea, en procesos de blanqueamiento o de teñido (Bradbury & Ley, 1972). Además, la fibra posee células corticales y cuticulares que poseen sustancias intercelulares, que se constituye de lípidos y proteínas no queratinicas, estos son los encargados de propagar agua, tintes y químicos, en esta región se presentan la resistencia en

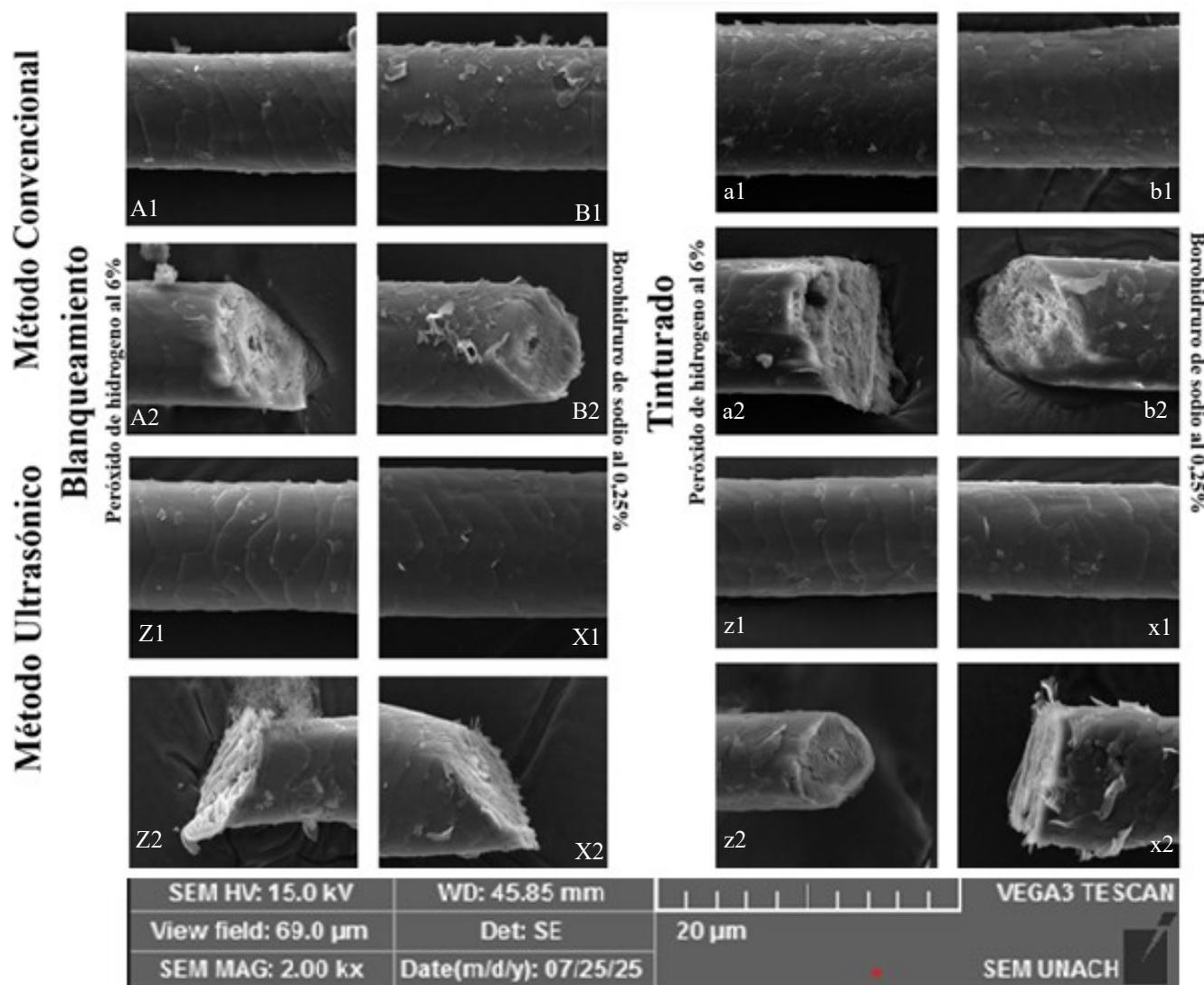
la fibra y la cohesión estructural (Bryson et al., 2009). Debajo de esto se encuentra, la corteza o (cortex), que se forma de células corticales alargadas, además que en el centro de esta se presentan la medulación (región menos densa y hueca de la fibra), la cual es responsable en parte de la flexibilidad, calidez y suavidad de la fibra (McGregor, 2012). Esto se ve reflejado en la **figura 13**, respecto a la estructura de la fibra.

Figura 13
Estructura morfológica de la fibra de alpaca



La diferencia notable se debe a la estructura de las células corticales y su organización dentro de la fibra. Por ejemplo, en la fibra de alpaca Huacaya se presentan dos tipos de células corticales de tamaños distintos y distribución asimétrica, lo que genera un comportamiento de contradicción diferencial y una textura superficial más fina, mientras que en las fibras de alpaca Suri se muestran células corticales uniformes y una superficie más homogénea en comparación a la Huacaya. Las imágenes SEM capturan estas diferencias morfológicas, mostrando la superficie suave y uniforme característica de la fibra de alpaca, atribuible a las disposición fina y densa de sus escamas (Shim & Jakes, 2006). En investigaciones como la de los autores Quispe, Huamani, & Ccopa (2025) y Chavez et al. (2024), se aplicó el SEM para comparar fibras de alpaca teñida con cochinilla y mezclas con fibra de proteína de leche, indicándose superficies lisas con escamas delgadas y, en casos puntuales, modificaciones en la morfología de la fibra al aplicarse una etapa de Mordentado. Por su parte los autores Rahman & Golam Nur (2014), destacan que el SEM permite examinar la eficiencia de los tratamientos previos al teñido de las fibras, indicando superficies limpias y uniformes. La técnica es también útil para medir el diámetro de la fibra y detectar variaciones en su estructura, después de haber sido aplicado un teñido. En la **figura 14**, se muestran las imágenes referentes a los cambios morfológicos que sucedieron en los distintos procesos a los que se sometió la fibra de alpaca. Se seleccionaron las muestras que mejores resultados obtuvieron en las pruebas físico-mecánicas, tanto en el proceso de blanqueamiento como el proceso de teñido de la fibra, escogiendo con ello las muestras de peróxido al 6% y borohidruro al 0,25% de los métodos convencionales y asistidos por ultrasonido.

Figura 14
Evaluación de los cambios morfológicos en fibras blanqueadas y teñidas



Nota: A: peróxido al 6% convencional; B: borohidruro al 0,25% convencional; Z: peróxido al 6% de ultrasonido; X: borohidruro al 0,25% de ultrasonido; a y b: muestras teñidas de las blanqueadas convencionalmente; z y x: muestras teñidas de las blanqueadas asistidas por ultrasonido.

Análisis

Al analizar las imágenes SEM, se verificó la morfología que posee la fibra de alpaca. En la **figura 14** en todas muestras se identifica la superficie, donde se observa un conjunto de escamas superficiales orientadas desde la raíz hasta la punta.

La fibra de alpaca tratada por el método convencional y blanqueamiento con peróxido al 6% (**figura 14, A1**), se observó que la fibra mantiene su estructura característica, la cual es una célula cuticular con una corteza en forma de tejas. Sin embargo, la fibra fue más desgastada debido al blanqueamiento.

Además, el teñido de esta fibra (**figura 14, a1**), se generó rupturas en sus bordes, en las escamas que recubren la corteza y con ello se formaron surcos en la superficie de la fibra

en sí. El corte transversal de ambas muestras (**figura 14, A2 y a2**) no evidenciaron anomalías.

En el caso de la fibra tratada por el método convencional con el tratamiento de borohidruro de sodio al 0,25% M/V, el cambio de morfología que se observó en la (**figura 14, B1**) es más notorio debido a que la estructura tuvo una formación más pronunciada de los surcos en la superficie de la fibra.

El mismo caso se genera en su posterior tratamiento de teñido (**figura 14, b1**), donde la fibra presentó la alteración notoria en la estructura superficial de la fibra generándose los surcos y el levantamiento de las escamas que protegen la estructura interna de la fibra. Sin embargo, en el caso de su corte transversal (**figura 14, B2 y b2**), no se presentaron alteraciones en dicha estructura.

Por su parte en el caso de las muestras tratadas con ultrasonido, el tratamiento de peróxido al 6% (**figura 14, X1**), no se generó daños, debido a que la fibra preservó su estructura morfológica original. Este fenómeno también se reflejó en la muestra teñida de este mismo tratamiento, donde no se observa daños de la fibra (**figura 14, x1**).

En el corte trasversal (**figura 14, X2 y x2**) de las muestras tampoco mostró cambios en ninguno de los casos.

La muestra tratada con ultrasonido y blanqueada con borohidruro de sodio al 0,25% (**figura 14, Z1**), no produjo cambios morfológicos considerables. El mismo resultado se obtuvo en la muestra posteriormente teñida bajo las condiciones asistidas por ultrasonido (**figura 14, z1**), y en el corte transversal (**figura 14, Z2 y z2**) de ambas muestras no se presentaron cambios morfológicos en la estructura interna.

Al haber observado cada una de las muestras, se realizó una comparativa entre todas las muestras y se separó jerárquicamente para analizar cuáles fueron las mejores muestras de cada uno de los métodos, determinando que las mejores muestras fueron en ambos casos los dos tratamientos del método asistido por ultrasonido, dado que, en estas muestras tanto en el blanqueamiento y posterior teñido no se generaron alteraciones considerables en la estructura morfológica de la fibra.

Discusión.

De acuerdo con el estudio de Mucha & Janeczek (2017), donde se menciona que las células cuticulares de la fibra de alpaca están dispuestas alrededor de la corteza como tejas, los bordes de las escamas del pelo fueron uniformes y lisos.

Además, los autores Chavez et al. (2024), acotan que la fibra de alpaca tiene una estructura fina, donde se encuentra rodeada por una capa externa de células cuticulares aplastadas que protegen las células corticales internas.

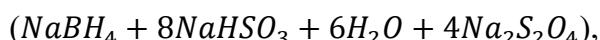
Los cambios morfológicos que se presentan en la estructura de las muestras con peróxido convencional se deben a la acción del peróxido de hidrógeno que tuvo en la fibra la cual consiste, en la activación del ion perhidroxilo (HO_2^-), el cual es responsable que se genere el blanqueamiento oxidativo, el mecanismo de acción que este tiene conlleva a la

oxidación y destrucción de pigmentos de melanina presentes en la fibra, además, esté ion transmite oxígeno y ataca los enlaces disulfuro de la fibra, permitiendo que de ese ataque se dé la ruptura de los enlaces S-S, con ello generando un color blanco en las fibras que se traten con una concentración de peróxido de hidrógeno (Cardamone, Yao, & Nuñez, 2004).

También se debe a la acción del método convencional, considerando que la exposición prolongada a la temperatura elevada del baño maría produjo la degradación de la fibra, que se da en gran parte a la escisión de cadenas mediante mecánicos de radicales libres de múltiples pasos (iniciación, propagación y terminación) y de la formación de productos oxidativos, generando desgaste en la fibra (Gupta et al., 2023).

En el caso de la muestra teñida, el cambio de la estructura morfológica se debe a la aplicación de altas temperaturas en el baño maría para que el tinte se fije (Niloy Rahaman et al., 2019). Las rupturas en los bordes, en las escamas que recubren la corteza y la formación de surcos en la superficie de la fibra son característicos de estos procesos (Ghasemian, Barani, & Khazaei, 2025).

El cambio que se presenta en las fibras con borohidruro convencional se debe a el mecanismo de acción del blanqueamiento con borohidruro de sodio consiste en la reacción de reducción la cual es (borohidruro de sodio + bisulfito de sodio + agua + ditionitio de sodio).



Esto menciona los autores Yilmazer & Kanik (2009), donde con esta reacción se genera un blanqueamiento similar al que se da en el peróxido de hidrogeno, además este compuesto genera la reducción de los enlaces disulfuro de la queratina liberando grupos (-SH), los responsables de generar la reacción y el posterior blanqueamiento.

Además, que la acción que tuvo el método convencional, el cual tuvo una exposición prolongada a la temperatura elevada del baño maría produjo la degradación de la fibra, que se da en gran parte a la escisión de cadenas mediante mecánicos de radicales libres de múltiples pasos (iniciación, propagación y terminación) y de la formación de productos oxidativos, generando desgaste en la fibra (Gupta et al., 2023).

Asimismo, en el proceso de teñido se genera estos cambios morfológicos en parte a las altas temperaturas que se requirió en el baño maría, con el fin de que el tinte se fije mejor en la fibra, no obstante, no se tienen en cuenta los cambios que esta llegan a sufrir por la exposición de la fibra a estas temperaturas altas (Niloy Rahaman et al., 2019).

La preservación de la estructura en las muestras con ultrasonido se debe a que McNeil & McCall (2011) menciona que, el ultrasonido no genera grietas en las escamas de las fibras tratadas porque la aplicación de frecuencias ultrasónicas sobre la fibra, favorecen a que la preservación de la estructura morfológica de la fibra ya sea, al realizarse el proceso de blanqueamiento como el teñido de la fibra.

Determinando que la fibra en ambos casos no presentó daños considerables en la estructura morfológica debido a que la fibra conserva la estructura externa, donde no se

generó daños en la corteza que esta recubierta de escamas alineadas en forma de teja (Mucha & Janeczek, 2017). A su vez, no se produjeron surcos en la corteza por ello las muestras de borohidruro asistido por ultrasonido se consideraron intactas.

La corteza llena de escamas que están alineadas en forma de teja, como mencionó Mucha & Janeczek (2017) en su investigación, se preservó adecuadamente. Además, que con esto se concluye que las muestras de ultrasonido no generaron daños en la fibra en el blanqueamiento y el teñido de la fibra, ya que, las frecuencias ultrasónicas preservan las propiedades que posee la estructura morfológica de la fibra (McNeil & McCall, 2011).

También se menciona que el ultrasonido produce un efecto de cavitación que no solo ayuda a que el agente químico penetre, sino que además disminuye la degradación proteica al impedir que la fibra esté expuesta por mucho tiempo a condiciones alcalinas (Qian et al., 2023).

Por su parte, las fibras tratadas por el método tradicional, el caso es completamente distinto al de su contraparte asistida por ultrasonido, dado que en este caso las fibras estuvieron más propensas a las alteraciones frecuentes que se pueden generar en la fibra, los cuales son la generación de rupturas en los bordes de la fibra, en las escamas que recubren la corteza y con ello se crearon surcos en la superficie de la fibra en sí, como mencionan (Ghasemian, Barani, & Khazaei, 2025).

En el caso del blanqueamiento convencional, se explica que con el objetivo de que suceda en el caso del tratamiento del peróxido de hidrógeno, se genera la reacción del peróxido de hidrógeno en la fibra la cual es la activación del ion perhidroxilo ([HO]_2^-) el cual es responsable que se genere el blanqueamiento oxidativo, el mecanismo de acción que este tiene conlleva a la oxidación y destrucción de pigmentos de melanina presentes en la fibra.

Además, este ion transmite oxígeno y ataca los enlaces disulfuro de la fibra, permitiendo que de ese ataque se dé la ruptura de los enlaces S-S, como menciona Cardamone, Yao, & Nuñez (2004), por ello se entiende que en los casos de los tratamientos de la fibra blanqueada con peróxido se haya generado ese cambio abrupto al alterarse la estructura de la fibra. El mismo caso sucede en las fibras blanqueadas con borohidruro el cual activa la reacción de reducción, como mencionan Yilmazer & Kanik (2009), con ello se entiende que en los casos de las muestras convencionales se hayan generado estos cambios bruscos en la fibra.

Este fenómeno también se observa en el proceso de teñido de las fibras, donde se denota que la fibra está más dañada que sus contrapartes asistidas por ultrasonido, esto en parte se entiende porque debido a las condiciones que se presentaron en el proceso del teñido, se debe aplicar una temperatura de alrededor de 80 - 90°C como lo menciona (Pei et al., 2019). Este requisito es fundamental en este proceso si no el proceso se ve alterado y el tinte no se fija en la fibra como tal.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Las etapas previas al teñido de la fibra de alpaca fueron cruciales. La fibra tratada por ultrasonido mostró una reducción considerable de grasa y suciedad comparada con muestras convencionales, disminuyendo su índice de amarillez (YI) debido a la cavitación generada por las frecuencias ultrasónicas. En el blanqueamiento asistido por ultrasonido, los compuestos empleados tuvieron mayor efectividad, evidenciándose en la disminución del YI y el aumento del índice de blancura (WI) respecto a las muestras convencionales.
- Las fibras que se blanquearon con el ultrasonido expusieron una mejor resistencia alcalina en comparación a las muestras sin tratar y blanqueadas por el método convencional. Este análisis se comprobó con la microscopía SEM que se ejecutó posteriormente.
- Las muestras del ultrasonido que se blanquearon y tiñeron fueron capaces de soportar mayor fuerza y carga en comparación a las convencionales. Esto se debió a que el ultrasonido cavitó de mejor manera los agentes químicos sin generar daño considerable en las propiedades físico-mecánicas de la fibra.
- Las fibras del método convencional mostraron desgaste estructural y menor capacidad de carga por la exposición prolongada a temperatura elevada en el baño maría. Esta degradación se generó por la por escisión de cadenas mediante mecanismos de radicales libres que formaron productos oxidativos.
- El SEM indicó que las muestras del ultrasonido preservaron la estructura morfológica original, mientras que las fibras del método convencional indicaron una mayor descamación y formación de surcos, especialmente en las muestras teñidas, evidenciando degradación por escisión de cadenas y formación de productos oxidativos mediados por radicales libres.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda que para estudio futuros se tenga en cuenta un proceso de tratamiento mejor estandarizado, para el desengrasado, blanqueamiento y teñido de la fibra, con el fin de que no se presente daños considerables en la fibra.
- Además, se recomienda que se aplique las mismas condiciones en estudios que se basen en el uso de agentes naturales sobre fibras de alpaca, para el blanqueamiento y el posterior teñido, para verificar si se presentan los mismos resultados obtenidos en el estudio.
- Por último, se recomendaría que los mismos tratamientos sean aplicados en otras fibras naturales para constatar las diferencias que se generan en cada uno de los parámetros que se analizaron en el estudio.

BIBLIOGRÁFIA

- Abdel-Halim, E. S. (2012). Simple and Economic Bleaching Process for Cotton Fabric. *Carbohydrate Polymers*, 88 (4), 1233–38. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.01.082>.
- Adeel, S., Saeed, M., Abdullah A., Khan, S.G., Habib, N., Kamran, M., & Zuber, M. (2020). Ultrasonic Assisted Improved Dyeing of Cellulosic Fabric Using Vat Blue 4. *Journal of Natural Fibers*, 17 (1), 1–8. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1458683>.
- Afşar, A., & Çetinkaya, F. (2008). A Research on Increasing the Effectiveness of Degreasing Process by Using Enzymes.” *Tekstil ve Konfeksiyon*, 18 (4), 278–83. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tekstilvekonfeksiyon/issue/23632/251701>.
- Allafi, F., Hossain, M. S., Lalung, J., Shaah, M., Salehabadi, A., Ahmad, M. I., & Shadi, A. (2020).. Advancements in Applications of Natural Wool Fiber: Review. *Journal of Natural Fibers*, 19 (2), 497–512. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1745128>.
- Aluigi, A., Tonetti, C., Rombaldoni, F., Puglia, D., Fortunati, E., Armentano, I., Santulli, C., Torre, L., & Kenny, J. M. (2014). Keratins Extracted from Merino Wool and Brown Alpaca Fibres as Potential Fillers for PLLA-Based Biocomposites. *Journal of Materials Science*, 49 (18), 6257–69. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8350-9>.
- ASTM. (2005). Standard Practice for Calculating yellowness and whiteness Indices from Instrumentally Measured Color Coordinates (E313-05). *American Society for Testing and Materials*, 0–4. <https://doi.org/10.1520/E0313-20.2>.
- Baaka, N., Haddar, W., Ben Ticha, M., Pessoa, M., & M'Henni, M.F. (2017). Sustainability Issues of Ultrasonic Wool Dyeing with Grape Pomace Colourant. *Natural Product Research*, 31 (14), 1655–62. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1285303>.
- Bahtiyari, M. I., & Duran, K. (2013). A Study on the Usability of Ultrasound in Scouring of Raw Wool. *Journal of Cleaner Production*, 41, 283–90. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.009>.
- Basu, G., Mishra, L., & Samanta, A. K. (2019). Appropriate Bleaching Technique for Coconut Fiber. *Journal of Natural Fibers*, 16 (3), 442–52. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1423263>.
- Boyaghchi, M. A., & Mohammadi Achachlouei, M. (2023). Correction of Yellowing Caused by Oxidation of Paper Cellulose Using Sodium Borohydride and Sodium Dithionite. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 38 (4), 296–315. <https://doi.org/10.22092/IJWPR.2023.105602.1747>.
- Bradbury, J. H., & K. F. Ley. (1972). The Chemical Composition of Wool. XI. Separation and Analysis of Exocuticle and Endocuticle. *Australian Journal of Biological Sciences*, 25 (6), 1235–48. <https://doi.org/doi.org/10.1071/BI9721235>.
- Bryson, W. G., Harland, D. P., Caldwell, J. P., Vernon, J. A., Walls, R. J., Woods, J. L., Nagase, S., Itou, T., & Koike, K. (2009). Cortical Cell Types and Intermediate Filament Arrangements Correlate with Fiber Curvature in Japanese Human Hair. *Journal of Structural Biology*, 166 (1), 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2008.12.006>.
- Cardamone, J. M., Nuñez, A., Garcia, R. A., & Aldema-Ramos, M. (2009). Characterizing Wool Keratin. *Research Letters in Materials Science*, 2009, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2009/147175>.

- Cardamone, J. M., Yao, J., & Nuñez, A. (2004). Controlling Shrinkage in Wool Fabrics: Effective Hydrogen Peroxide Systems. *Textile Research Journal*, 74 (10), 887–98. <https://doi.org/10.1177/004051750407401008>.
- Castillo, L., Sierra, A., Linares, I., Martínez, V., & Teutil, E. (2023). A Critical Review of Textile Industry Wastewater: Green Technologies for the Removal of Indigo Dyes. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04810-2>.
- Chanjí, E. D. R., Peche, O., & Aucahuasi, J. (2017). *Proyecto de industrialización del hilado de fibra de alpaca de la empresa 'Nina Pitay SAC'* [Tesis de pregrado, Universidad San Ignacio de Loyola]. Repositorio Institucional USIL. <https://repositorio.usil.edu.pe/handle/USIL/3456>.
- Chavez, B., Almirón, J., Churata, R., Valverde-Ponce, K., Tupayachy-Quispe, D., & Velasco, F. (2024). Characterization and evaluation of the mechanical properties of blended yarns based on alpaca and milk protein fibers. *Revista de Gestao Social e Ambiental*, 18 (9), 1–16. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-132>.
- Chilakamarry, C. R., Mahmood, S., Saffe, S. N. B. M., Arifin, M. A. B., Gupta, A., Sikkandar, M. Y., Begum, S. S., & Narasaiah, B. (2021). Extraction and Application of Keratin from Natural Resources: A Review. *3 Biotech*, 11 (5), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02734-7>.
- Çiçekler, M., & Tutus, A. (2023a). A study on sodium borohydride assisted dithionite bleaching of mixed office wastes. *ICIAS*, 1(1), 70-74.. <https://www.researchgate.net/publication/369088336>.
- Çiçekler, M., & Tutuş, A. (2023b). Effects of sodium borohydride on peroxide bleaching of Pinus brutia Ten. and wheat straw pulps. *Turkish Journal of Forestry*, 24(3), 323-328. <https://doi.org/10.18182/tjf.1261515>.
- Czaplicki, Z., & Ruszkowski, K. (2014). Optimization of scouring alpaca wool by ultrasonic technique. *Journal of Natural Fibers*, 11(2), 169-183. <https://doi.org/10.1080/15440478.2013.864577>.
- Czyż, K., Wyrostek, A., Smoliński, J., Kondracka, N., & Pietrzyńska, M. (2025). Selected parameters of Huacaya alpacas fibers and Olkuska sheep wool. *Journal of Natural Fibers*, 22(1). <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2436075>.
- Czyż, K., Wyrostek, A., Wojdon, A., & Jankowska, D. (2024). Selected physical and mechanical properties of alpaca fibers differing in color. *Journal of Natural Fibers*, 21(1). <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2348626>.
- Dang, Z., Elder, T., & Ragauskas, A. J. (2007). Alkaline peroxide treatment of ECF bleached softwood kraft pulps. Part 1. Characterizing the effect of alkaline peroxide treatment on carboxyl groups of fibers. *Holzforschung*, 61(4), 445-450. <https://doi.org/10.1515/HF.2007.067>.
- Elias, A., & Saravanakumar, M. P. (2019). A critical review on ultrasonic-assisted dye adsorption: Mass transfer, half-life and half-capacity concentration approach with future industrial perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(21), 1959-2015.. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1601488>.
- Filho, W. L., Perry, P., Heim, H., Dinis, M. A. P., Moda, H., Ebhuoma, E., & Paço, A. (2022). An overview of the contribution of the textiles sector to climate change.

- Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.973102>.
- Ghasemian, R., Barani, H., & Khazaei, F. (2025). Surface modification and performance of wool fibers after combined plasma and enzyme treatments. *Scientific Reports*, 15(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93665-3>.
- Ghimiş, S.-B., Mîră, A.-L., Vlaicu, A., Zaharia, E., Bomboş, M. M., & Vasilievici, G. (2023). Impregnated sheep wool fibers with an antimicrobial effect. *Chemistry Proceedings*, 13(1), 1. <https://doi.org/10.3390/chemproc2023013001>.
- Gonzalez, V., Wood, R., Lee, J., Taylor, S., & Bussemaker, M. J. (2019). Ultrasound-enhanced hair dye application for natural dyeing formulations. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 294-304. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.11.028>.
- Gupta, J., Taneja, S., Bharti, R., Bhalla, V. K., & Jain, A. (2023). Effect of laser bleaching, ultrasonic scaling and powered tooth brushing on surface roughness and bacterial adherence of class V composite restorations. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 13(3), 429-435. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2023.03.012>.
- Gürkan Ünal, P., Atav, R., Ilarslan, S., & Kastaci, B. B. (2019). The effect of using alpaca and silk instead of wool in weft yarns on the woollen fabric properties. *Journal of Natural Fibers*, 16(7), 1043-1054. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1448319>.
- Harifi, T., & Montazer, M. (2015). A review on textile sonoprocessing: A special focus on sonosynthesis of nanomaterials on textile substrates. *Ultrasonics Sonochemistry*, 23, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.022>.
- Harris, M., & Smith, A. L. (1936). Oxidation of wool: Alkali-solubility test for determining the extent of oxidation. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 17(4), 577. <https://doi.org/10.6028/jres.017.027>.
- Hassan, M. M., & Saifullah, K. (2023). Ultrasound-assisted sustainable and energy efficient pre-treatments, dyeing, and finishing of textiles – A comprehensive review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101109>.
- Hosseinezhad, M., Gharanjig, K., Imani, H., & Razani, N. (2020). Green dyeing of wool yarns with yellow and black myrobalan extract as bio-mordant with natural dyes. *Journal of Natural Fibers*, 17(12), 1747-1769. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848735>.
- Hosseinezhad, M., Gharanjig, K., Adeel, S., Rouhani, S., Imani, H., & Razani, N. (2022). The effect of ultrasound on environmentally extraction and dyeing of wool yarns. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 17. <https://doi.org/10.1177/15589250221104471>.
- Huamani, L. (2024). *Efecto del teñido de tinte de "cochinilla" (Dactylopius coccus) y mordientes metálicos sobre las propiedades colorimétricas, bandas químicas y de solidez de color en fibra de alpaca huacaya (Vicugna pacos)* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac]. Repositorio Institucional UNAMBA. <https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1492>.
- Huiman Cruz, A. (2022). Los residuos peligrosos generados en la industria textil peruana para el caso de la alta costura, fibra de alpaca y curtiembre. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 25(49), 115-133. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i49.21097>.
- Hurren, C., Cookson, P., & Wang, X. (2008). The effects of ultrasonic agitation in laundering

- on the properties of wool fabrics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(6), 1069-1074. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2008.04.002>.
- Jankowska, D., Wyrostek, A., Patkowska-Sokoła, B., & Czyż, K. (2019). Comparison of physico-mechanical properties of fibre and yarn made of alpaca, sheep, and goat wool. *Journal of Natural Fibers*, 18(10), 1512-1517. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1691126>.
- Ketema, A., & Worku, A. (2020). Review on intermolecular forces between dyes used for polyester dyeing and polyester fiber. *Journal of Chemistry*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6628404>.
- Kherdekar, G., & Adivarekar, R. V. (2017). Effect of different wool scouring techniques on physical properties of wool fiber. *International Journal of Modern Trends in Engineering & Research*, 4(5), 163-167. <https://doi.org/10.21884/ijmter.2017.4169.nbif7>.
- Vaca-Cardenas, M. L., Oleas, M., Vaca-Cárdenas, M. E., & Velasco, A. (2021). Characterization of the physical-mechanical properties of alpaca fiber (*Vicugna pacos*) at the Tunshi Experimental Station. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, 1(1), 397-410. <https://doi.org/10.18502/epoch.v1i1.9574>.
- Larson, M. G. (2008). Analysis of variance. *Circulation*, 117(1), 115-121. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.654335>.
- León, C., & Bojorque, R. (2021). *Diseño de una escarmenadora automática para el proceso de elaboración de lana de alpaca en la comunidad Cebada Loma, parroquia Jerusalén* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20123>.
- Li, Q., Lin, T., & Wang, X. (2012). Effects of ultrasonic treatment on wool fibre and fabric properties. *Journal of the Textile Institute*, 103(6), 662-668. <https://doi.org/10.1080/00405000.2011.597569>.
- Li, Q., Wei, Z., Li, M., Li, S., Ni, L., Quan, H., & Zhou, Y. (2022). An efficient ultrasonic-assisted bleaching strategy customized for yak hair triggered by melanin-targeted Fenton reaction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, 106020. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106020>.
- Liu, X., Hurren, C. J., Wang, L., & Wang, X. (2004). Effects of bleaching and dyeing on the quality of alpaca tops and yarns. *Fibers and Polymers*, 5(2), 128-133. <https://doi.org/10.1007/BF02902926>.
- Liu, X., Wang, X., & Wang, L. (2002). A study of Australian alpaca fibres. *Proceedings of the Third China International Wool Textile Conference*, 30(12), 102-111. <http://hdl.handle.net/10536/DRO/DU:30013878>.
- Lupton, C. J., McColl, A., & Stobart, R. H. (2006). Fiber characteristics of the Huacaya alpaca. *Small Ruminant Research*, 64(3), 211-224. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.04.023>.
- Madara, D. S., & Namango, S. S. (2014). Wool grease recovery from scouring effluent at textile mill. *Journal of Agriculture, Pure and Applied Science and Technology*, 1-9. <https://n9.cl/iol6f>.
- Mason, T. J. (2003). Sonochemistry and sonoprocessing: The link, the trends and (probably) the future. *Ultrasonics Sonochemistry*, 10(4-5), 175-179.

[https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(03\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(03)00086-5).

- McGregor, B. A. (2012). *Properties, processing and performance of rare natural animal fibres: A review and interpretation of existing research results*. Rural Industries Research and Development Corporation. <https://n9.cl/soqwr>.
- McNeil, S. J., & McCall, R. A. (2011). Ultrasound for wool dyeing and finishing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(1), 401-406. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.07.007>.
- Motaghi, Z. (2018). An economical dyeing process for cotton and wool fabrics and improvement their antibacterial properties and UV protection. *Journal of Natural Fibers*, 15(6), 777-788. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1364204>.
- Mucha, A., & Janeczek, M. (2017). Morphological and elemental analysis of alpaca hair using scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX). *Medycyna Weterynaryjna*, 74(5), 295-300. <https://doi.org/dx.doi.org/10.21521/mw.6046>.
- Muthu, S. S., & Gardetti, M. A. (2016). *Sustainability in textile and apparel industries: Going global*. Bloomsbury Publishing. <https://doi.org/10.5040/9781501317545.ch-004>.
- Nanda, A., Mohapatra, B. B., Mahapatra, A. P. K., Mahapatra, A. P., & Mahapatra, A. P. (2021). Multiple comparison test by Tukey's honestly significant difference (HSD): Do the confident level control type I error. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*, 6(1), 59-65. <https://doi.org/10.22271/math.2021.v6.i1a.636>.
- Niloy Rahaman, M., Hossain, M. S., Razzak, M., Uddin, M. B., Chowdhury, A. M. S., & Khan, R. A. (2019). Effect of dye and temperature on the physico-mechanical properties of jute/PP and jute/LLDPE based composites. *Helijon*, 5(6), e01753. <https://doi.org/10.1016/j.helijon.2019.e01753>.
- Pan, Y., Hurren, C. J., & Li, Q. (2018). Effect of sonochemical scouring on the surface morphologies, mechanical properties, and dyeing abilities of wool fibres. *Ultrasonics Sonochemistry*, 41, 227-233. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.09.045>.
- Parlato, M. C. M., & Porto, S. M. C. (2020). Organized framework of main possible applications of sheep wool fibers in building components. *Sustainability*, 12(3), 761. <https://doi.org/10.3390/su12030761>.
- Pei, L., Luo, Y., Gu, X., Dou, H., & Wang, J. (2019). Diffusion mechanism of aqueous solutions and swelling of cellulosic fibers in silicone non-aqueous dyeing system. *Polymers*, 11(3), 411. <https://doi.org/10.3390/polym11030411>.
- Qian, J., Chen, D., Zhang, Y., Gao, X., Xu, L., Guan, G., & Wang, F. (2023). Ultrasound-assisted enzymatic protein hydrolysis in food processing: Mechanism and parameters. *Foods*, 12(21), 4027. <https://doi.org/10.3390/foods12214027>.
- Quispe, A., Huamani, L., & Ccopa, R. (2025). Colorimetric and textile properties of Huacaya alpaca fibers dyed with cochineal: A sustainable approach. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 19(1), e011033. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n1-150>.
- Rahman, M., & Nur, M. G. (2014). Feasible application of modern eco-friendly treatment of wool fabric before coloration. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 4(7), 1-7. www.ijrsp.org.

- Ramos, E., Calatrava, S. F., & Jiménez, L. (2008). Bleaching with hydrogen peroxide: A review. *Afinidad*, 65(537), 366-373. <https://raco.cat/raco/index.php/es/inicio/#gsc.tab=0>.
- Rehman, F. U., Adeel, S., Ahmad, T., Mateen, A., & Amin, N. (2022). Statistical optimization of parameters for eco-friendly dyeing of cotton using Direct Red 31 dye. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 7491-7501. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1951420>.
- SSaca, S. (2023). *Propiedades físico-mecánicos de la fibra de alpaca utilizada en la transformación artesanal* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Digital ESPOCH. <https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/19234>.
- Sentená Montero, M. A. (2021). *Huella ecológica del sector textil confección en Colombia para el año 2018* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/52684>.
- Serrano, O., & Vilcapaza, G. (2023). *Evaluación y determinación de colorantes azoicos mediante la aplicación de ultrasonido como método alternativo en el teñido de fibras de alpaca* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio UCSM. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12345>.
- Shim, S., & Jakes, K. A. (2006). Differentiating alpaca fibres by scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometry. *Journal of Camel Practice and Research*, 13(2), 193-199. <https://shre.ink/oUck>.
- TTapia, S. (2023). *Evaluación de la fibra de alpaca (*Lama pacos*) teñida con colorante del tallo de tankar (*Berberis boliviana L.*) a distintos mordientes y parámetros* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac]. Repositorio Institucional UNAMBA. <https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1324>.
- Thakore, K. A., Smith, C. B., & Clapp, T. G. (1990). Application of ultrasound to textile wet processing. *American Dyestuff Reporter*, 79(10). <https://p2infthouse.org/ref/28/27040.pdf>.
- Yamauchi, K., Yamauchi, A., Kusunoki, T., Kohda, A., & Konishi, Y. (1996). Preparation of stable aqueous solution of keratins, and physicochemical and biodegradational properties of films. *Journal of Biomedical Materials Research*, 31(4), 439-444. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4636\(199608\)31:4<439::AID-JBM1>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4636(199608)31:4<439::AID-JBM1>3.0.CO;2-M).
- Yilmazer, D., & Kanik, M. (2009). Bleaching of wool with sodium borohydride. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 4(3), 45-50. <https://doi.org/10.1177/155892500900400305>.
- Yusuf, M., Shabbir, M., & Mohammad, F. (2017). Natural colorants: Historical, processing and sustainable prospects. *Natural Products and Bioprospecting*, 7(1), 123-145. <https://doi.org/10.1007/s13659-017-0119-9>.
- Zhou, M., Meng, Z., Sun, Y., Sun, X., & Zhang, D. (2016). Ultrasound-assisted chemical dissolution for quantitative analysis of wool in textile blends. *Journal of the Textile Institute*, 107(2), 165-170. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1018706>.

ANEXOS

Anexo 1: Proceso de desengrasado de la fibra

Figura 15 Desengrasado convencional

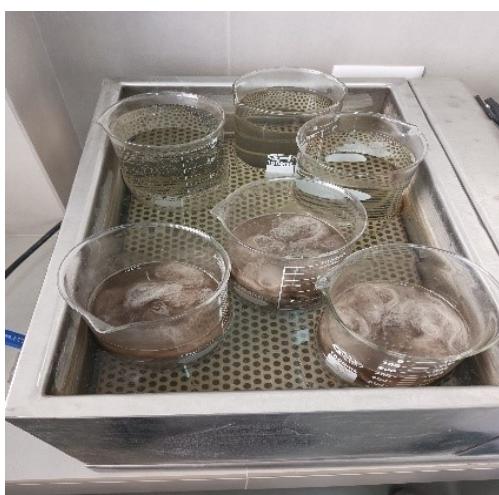


Figura 16 Secado de muestras desengrasadas



Anexo 2: Preparación de reactivos para blanqueamiento

Figura 17 Preparación de borohidruro de sodio



Figura 18 preparación de peróxido de hidrogeno

Anexo 3: Proceso de blanqueamiento con peróxido y borohidruro

Figura 19 Blanqueamiento con borohidruro



Figura 20 Blanqueamiento con peróxido



Anexo 4: Procesos asistido por ultrasonido

Figura 21 Desengrasado ultrasónico



Anexo 5: Determinación de grasa por el método de Soxhlet

Figura 22 Muestras en el equipo de Soxhlet



Figura 23 Secado de muestras de grasa



Anexo 6: Pruebas de alcalinidad

Figura 24 Muestras en medio alcalino



Figura 25 Secado de muestras de alcalinidad



Anexo 7: Teñido en fibras por el método convencional y ultrasónico

Figura 26 Teñido convencional



Figura 27 Teñido ultrasónico



Anexo 8: Pruebas físico-mecánicas en muestras blanqueadas y teñidas

Figura 28 Análisis de parámetros obtenidos en el Software SHIMADZU

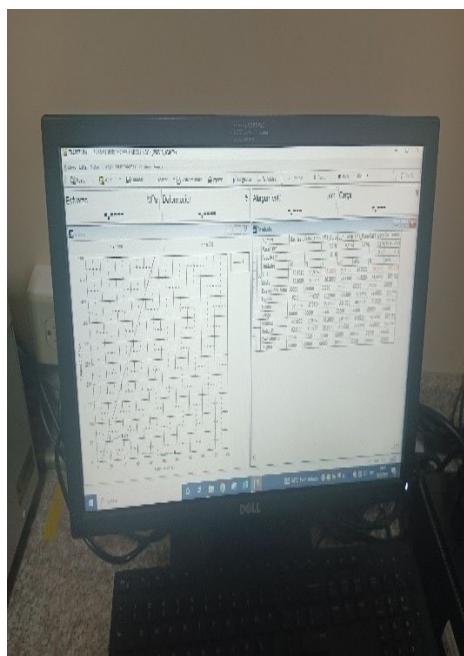


Figura 29 Prueba físico-mecánica en muestra blanqueada



Figura 30 Prueba físico-mecánica en muestra teñida



Anexo 9: Microscopía electrónica de barrido SEM

Figura 31 Vista general

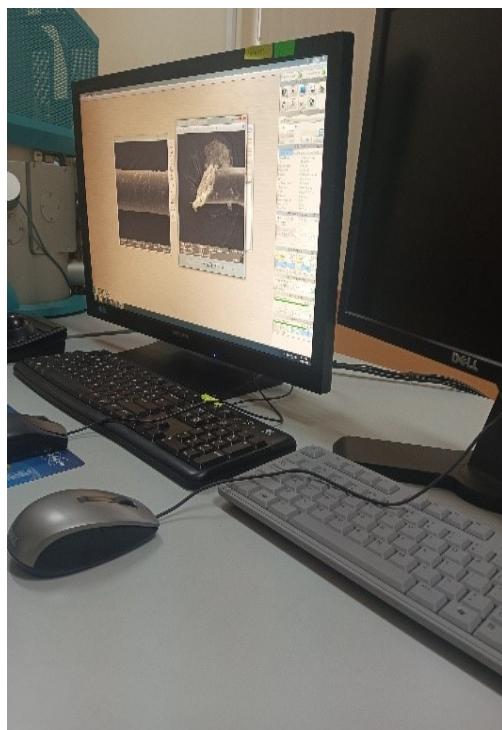


Figura 32 Vista de corte

